

# **TRABAJO FIN DE MÁSTER**

## **IDENTIFICACIÓN Y SEGUIMIENTO CON TELEDETECCIÓN DE LA FENOLOGÍA DE LOS CULTIVOS EN EL POLÍGONO DE RIEGO DE LA VIOLADA (HUESCA) 2015-2016**

***Autor: José Joaquín Tello Torres***

***Directores: M<sup>a</sup> Auxiliadora Casterad Seral y Raquel Montorio Llovería***

**Noviembre de 2016**



**Universidad  
Zaragoza**

**Departamento de Geografía  
y Ordenación del Territorio**



## Resumen

*Gracias a la disponibilidad de nuevas tecnologías geoespaciales y de la información, como es el caso de la teledetección que nos ofrecen información localizada espacialmente y actualizada sobre los cultivos agrícolas, se puede mediante el análisis multitemporal de imágenes de satélite identificar y estudiar la evolución de los cultivos. En este contexto, se va a estudiar la utilidad de series temporales de índices de vegetación derivados de imágenes satélite para extraer información fenológica en parcelas de cultivo. El trabajo se desarrolla en el polígono de riego La Violada (Almudévar, Huesca) y las series temporales de índices de vegetación se obtienen de imágenes de satélite Landsat 8, Sentinel-2 y Deimos-1. De los tres índices propuestos, NDVI, SAVI y VARI, se elige para tales propósitos el NDVI, y se constata la necesidad de realizar calibraciones entre sensores para tener una serie multitemporal de datos coherentes. Los resultados obtenidos muestran que se puede identificar fácilmente si hay un cultivo de invierno, de verano, una doble cosecha o un cultivo forrajero; distinguir las diferentes etapas, inicial, desarrollo, media y maduración del ciclo vegetativo del cultivo; y ver si hay diferencias entre parcelas y año en la duración de dichas etapas. En algunos cultivos, se consigue asociar ciertos estados fenológicos a tramos concretos de la curva de evolución de NDVI y de su curva de pendientes, si bien se constata la necesidad de una serie temporal de imágenes más densa para poder determinar con exactitud dicho momento e identificar otros estados.*

**Palabras Clave:** *Imágenes de satélite, fenología de cultivos, índices de vegetación*

## Abstract

*Thanks to the availability of information and new geospatial technologies, such as remote sensing that provides us spatially located and updated information on agricultural crops, it is possible to identify and study the development of crops throughout the multi-temporal satellite image analysis. In this context, the use of time series of vegetation indexes derived from satellite images to extract phenological information on crop plots will be studied. The work is developed in the irrigated district of La Violada (Almudévar, Huesca) and the temporal series of vegetation indices are obtained from satellite images Landsat 8, Sentinel-2 and Deimos-1. Among NDVI, SAVI and VARI, the NDVI is chosen for such purposes, and it is necessary to carry out calibrations between sensors to get a consistent multitemporal series of coherent data. The results obtained show that it is possible to easily identify if there is a winter, summer, double crop or forage crop; To distinguish the different stages, initial, development, average and maturation of the vegetative cycle of the crop; And see if there are differences between plots and year in the duration of these stages. In some crops, it is possible to associate certain phenological states with specific sections of the evolution curve of NDVI and its slope curve, although the need for a denser time series of images is verified in order to be able to accurately determine the moment and identify other states.*

**Key Words:** *Satellite imagery, crop phenology, vegetation indexes*

---

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. Introducción .....	pág. 1
1.1. Justificación del trabajo.....	pág. 1
1.2. Estado de la cuestión .....	pág. 2
2. Objetivos .....	pág. 3
2.1. Objetivos académicos .....	pág. 3
2.2. Objetivos científicos.....	pág. 3
3. Ámbito de estudio .....	pág. 3
3.1. Localización y características generales del área de estudio .	pág. 3
3.2. Principales cultivos y su fenología.....	pág. 5
4. Imágenes satelitales .....	pág. 8
4.1. Satélites-sensores utilizados .....	pág. 8
4.2. Disponibilidad y selección de imágenes.....	pág. 10
4.3. Preparación de las imágenes y obtención de índices espec- trales.....	pág. 13
4.3.1. Corrección geométrica.....	pág. 13
4.3.2. Corrección radiométrica.....	pág. 13
4.3.3. Reproyección, recorte y ajuste espacial de la ima- gen .....	pág. 14
4.3.4. Obtención de índices espectrales .....	pág. 14
5. Comparación, relación y calibración de los índices de vegetación de- rivados de Landsat, Sentinel y Deimos .....	pág. 17
5.1. Landsat 8 escena 199/31 frente a escena 200/31 .....	pág. 17
5.2. Landsat 8 frente a Sentinel .....	pág. 20
5.3. Landsat 8 frente a Deimos .....	pág. 25
6. Caracterización fenológica de las parcelas de estudio a partir de se- ries temporales de índices de vegetación.....	pág. 26
6.1. Grado de complementación de los diferentes satélites al construir las series temporales .....	pág. 26
6.2. Obtención de series temporales de índices de vegetación ....	pág. 27
6.3. Comparación de las series temporales obtenidas con los diferentes índices.....	pág. 28

6.4. Aplicación de las series temporales de índices de vegetación a la identificación y seguimiento fenológico de los cultivos. .	pág. 31
6.4.1. Identificación de cultivos .....	pág. 31
6.4.2. Comparación fenológica entre parcelas y entre campañas agrícolas .....	pág. 35
6.4.3. Identificación de fases fenológicas .....	pág. 37
7. Conclusiones .....	pág. 44
8. Bibliografía .....	pág. 46
9. Anejos .....	pág. 49
ANEJO 1: Datos fenológicos de las parcelas de estudio (2015-2016) .....	pág. 1
ANEJO 2: Series temporales de NDVI y su pendiente en las parcelas de estudio (2015-2016) .....	pág. 4

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localización de las parcelas de estudio en el Polígono de riego de La Violada (Almudévar, Huesca, España) .....	pág. 4
<b>Figura 2.</b> Fases fenológicas de los cultivos de invierno: trigo y cebada ...	pág. 6
<b>Figura 3.</b> Fases fenológicas del maíz .....	pág. 7
<b>Figura 4.</b> Fases fenológicas del girasol .....	pág. 7
<b>Figura 5.</b> Grado de cobertura de la zona de estudio ofrecido por las escenas 199/31 y 200/31 de Landsat.....	pág. 10
<b>Figura 6.</b> Ejemplos de índices de vegetación NDVI, SAVI y VARI en una imagen Sentinel-2 .....	pág. 16
<b>Figura 7.</b> Ejemplo de visualización del índice de vegetación VARI con píxeles erróneos o artefactos .....	pág. 16
<b>Figura 8.</b> Interrelaciones entre NDVIs de pares seleccionados entre escenas 199/31 y 200/31 de Landsat 8. ....	pág. 17
<b>Figura 9.</b> Interrelaciones entre NDVIs de las diferentes cubiertas de pares seleccionados entre escenas 199/31 y 200/31 de Landsat .....	pág. 18
<b>Figura 10.</b> Esquema de la metodología empleada para la calibración entre sensores de diferentes satélites. ....	pág. 20
<b>Figura 11.</b> Transectos elegidos sobre diferentes coberturas para la calibración .....	pág. 20
<b>Figura 12.</b> Representación de las agrupaciones de los píxeles para extraer los valores de las imágenes con diferentes resoluciones espaciales ..	pág. 21
<b>Figura 13.</b> Interrelaciones entre índices de vegetación de Landsat 8 y Sentinel-2 .....	pág. 23
<b>Figura 14.</b> Interrelaciones entre índices de vegetación de Landsat 8 y Deimos .....	pág. 25
<b>Figura 15.</b> Distribución de las imágenes satelitales 2015 y 2016 disponibles para la realización de las series temporales .....	pág. 26
<b>Figura 16.</b> Máscaras utilizadas para la obtención de series temporales de índices de vegetación en las parcelas de estudio .....	pág. 27

<b>Figura 17.</b> Modelo esquemático de la metodología empleada para la eliminación de píxeles de borde en las parcelas de estudio .....	pág. 28
<b>Figura 18.</b> Comparación de las series temporales de índices de vegetación NDVI y SAVI .....	pág. 29
<b>Figura 19.</b> Comparación de las series temporales de índices de vegetación NDVI y VARI-TOA (2016).....	pág. 30
<b>Figura 20.</b> Series temporales NDVI de parcelas con un cultivo por campaña agrícola (2015 y 2016) .....	pág. 31
<b>Figura 21.</b> Series temporales NDVI de parcelas con doble cosecha en alguna campaña (2015-2016).....	pág. 32
<b>Figura 22.</b> Series temporales NDVI de parcelas con cultivo de primavera y Raigrás/Alfalfa (sin filtro y con filtro de suavizado) .....	pág. 34
<b>Figura 23.</b> Series temporales NDVI de parcelas con cultivos de invierno en la campaña 2015 y 2016 .....	pág. 35
<b>Figura 24.</b> Series temporales NDVI de parcelas con cultivo de verano, campaña 2015 y 2016 .....	pág. 37
<b>Figura 25.</b> Series temporales de NDVI (línea continua) y su pendiente (línea punteada) en parcelas de doble cosecha con girasol .....	pág. 39
<b>Figura 26.</b> Series temporales de NDVI (línea continua) y su pendiente (línea punteada) en parcelas de maíz.....	pág. 40
<b>Figura 27.</b> Series temporales de NDVI y su pendiente en parcelas con cebada y trigo (2015 y 2016) .....	pág. 42
<b>Figura 28.</b> Serie temporal de NDVI y su pendiente para la parcela de alfalfa en 2016.....	pág. 43

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Parcelas de estudio y cultivos en los que se ha realizado el seguimiento fenológico (2015-2016).....	pág. 5
<b>Tabla 2.</b> Relación de bandas para una imagen de Landsat 8.....	pág. 8
<b>Tabla 3.</b> Distribución de las bandas en Sentinel-2.....	pág. 9
<b>Tabla 4.</b> Disponibilidad de imágenes Landsat 8 válidas para el estudio ...	pág. 11
<b>Tabla 5.</b> Disponibilidad de imágenes Sentinel-2 válidas para el estudio ..	pág. 11
<b>Tabla 6.</b> Disponibilidad de imágenes Deimos-1 válidas para el estudio ...	pág. 12
<b>Tabla 7.</b> Número de imágenes válidas disponibles según satélite (2014-2016).....	pág. 12
<b>Tabla 8.</b> Resultados del test estadístico de regresión para Landsat 199/31 frente Landsat 200/31 .....	pág. 18
<b>Tabla 9.</b> Resultados de las estadísticas del test T de Student para dos muestras relacionadas, Landsat 199/31 frente Landsat 200/31 .....	pág. 19
<b>Tabla 10.</b> Resultados de los test estadísticos de regresión de Landsat 8 y Sentinel-2.....	pág. 24
<b>Tabla 11.</b> Resultados de las estadísticas del test T de Student para dos muestras relacionadas de Landsat 8 y Sentinel-2 .....	pág. 24
<b>Tabla 12.</b> Comparación de la identificación realizada con serie temporal de NDVI con la información de campo disponible en las parcelas de estudio (2015 y 2016) .....	pág. 33

## **1. INTRODUCCIÓN**

Durante todo el siglo XX ha habido una constante intensificación de la producción agrícola debida en gran parte tanto al largo proceso de modernización, que permite una mayor productividad en menor tiempo, como a la especialización de las actividades agrícolas hacia diferentes tipos de aprovechamiento.

Las limitaciones que el medio natural impone en el territorio aragonés a las actividades agrícolas han llevado tradicionalmente a sus agricultores a impulsar las obras de regadío que la tecnología existente permitiese, como es el caso del polígono de riego de la Cuenca hidrográfica del Barranco de la Violada (Almudévar) en el cuál se centra este trabajo.

Estos avances tecnológicos en el campo de la agricultura no han cesado, ya que, en las últimas décadas, y gracias a la disponibilidad de nuevas tecnologías geoespaciales y de la información ha podido hacerse realidad el manejo de nuevas técnicas de análisis y herramientas que nos ofrecen información localizada espacialmente y actualizada sobre los cultivos en cada momento determinado y su evolución, es el caso de la Teledetección.

La Teledetección suministra información periódica y actualizada del territorio a partir de la medición de la intensidad de diferentes longitudes de onda de energía electromagnética que se reflejan desde la superficie terrestre. La intensidad con la que la energía electromagnética es reflejada, varía de acuerdo a la naturaleza física y propiedades ópticas de la superficie sobre la cual la energía incide (García, 2013).

La gran variedad de satélites actualmente disponibles, con su amplio rango de resoluciones espaciales, ofrece una amplia gama de aplicaciones orientadas a la gestión agronómica: desde el seguimiento de grandes superficies como cuencas hidrográficas o regiones agrícolas hasta el control del estado del cultivo al nivel de parcela.

Mediante el análisis multitemporal de imágenes de satélite, es posible hacer un seguimiento de la evolución de las diferentes comunidades vegetales y de los cultivos agrícolas.

La variabilidad espacial en el vigor vegetativo de los cultivos, así como la estimación de diferentes variables biofísicas y bioquímicas pueden abordarse a partir de estas técnicas de percepción remota (Lopez et al., 2005).

### **1.1. Justificación del trabajo**

El presente trabajo desarrollado durante la estancia en prácticas en la Unidad de Suelos y Riegos del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria (CITA) se enmarca en el Proyecto de investigación-retos: "Diseño, gestión y control medioambiental de regadíos modernizados por aspersión en el valle del Ebro" dentro del objetivo "Analizar la contaminación difusa en regadíos modernizados por aspersión" en esta Unidad.

En este contexto, se necesita realizar la identificación y seguimiento de la fenología de los cultivos en la cuenca de la Violada (Almudévar, Huesca) contemplándose en el proyecto apoyarse en teledetección satelital. La información obtenida permitirá tener coeficientes de cultivo y datos sobre su fenología más ajustados a las condiciones reales en campo, así como identificar las superficies de cada cultivo y con doble cosechas, aspectos relevantes en la aplicación de modelos de simulación del movimiento de agua y transporte de solutos; y del crecimiento de cultivos y el balance de agua y nutrientes. Estos modelos se utilizan en el análisis de la contaminación difusa inducida por los retornos de riego en la cuenca objeto de estudio.



## 1.2. Estado de la cuestión

El potencial que ofrecen las imágenes obtenidas por teledetección en agricultura es muy grande debido a que se trata de información distribuida espacial y temporalmente lo que permite supervisar procesos agrícolas, y poder con ello evaluar con mayor precisión diferentes aspectos y variables relacionadas con la agricultura y más específicamente con los cultivos.

El estudio de los eventos periódicos naturales involucrados en la vida de las plantas se denomina fenología (Volpe, 1992). El seguimiento de la fenología de los cultivos es una tarea muy importante para agricultores y agrónomos, dado que mediante este seguimiento se podrán efectuar decisiones en cuanto a manejo de los cultivos, riegos, control de plagas y enfermedades, identificación de épocas críticas, etc.

Numerosos son los autores que han investigado sobre el uso de imágenes de satélite para identificación y seguimiento de cultivos. Diferentes sensores y satélites de muy distintas resoluciones espaciales se han utilizado con este fin. Las series temporales de índices de vegetación obtenidas con teledetección permiten el seguimiento de la dinámica de la cubierta vegetal y de su desarrollo, así como su heterogeneidad espacial a lo largo del período fenológico.

Siguiendo a Thenkabail (2012), muchos de los trabajos de seguimiento de cubiertas vegetales pueden ser estimadas en grandes áreas de forma rentable y eficiente mediante el uso de técnicas de teledetección y el análisis de series temporales de datos obtenidas a partir de imágenes satélite de alta resolución temporal como AVHRR-NOAA, MODIS, SPOT-VEGETATION etc. Autores como Zhang et al., (2003) analizan las series temporales de datos obtenidas por el sensor MODIS. Sin embargo, la resolución espacial que ofrecen estas imágenes es insuficiente en agricultura cuando se quiere realizar el seguimiento del cultivo a escala de parcela, explotación agraria, etc.

Otros trabajos como el de Steven et al., (2003), utilizan la espectro-radiometría de campo como herramienta para el seguimiento fenológico de parcelas de cultivo, relacionándolo con diferentes variables agronómicas vinculadas con la producción, como índice de área foliar, biomasa, etc. En estos casos, la temporalidad de datos a lo largo del ciclo del cultivo suele ser adecuada para la caracterización fenológica pues las medidas se toman periódicamente durante el ciclo del cultivo y especialmente en los momentos claves del mismo. Sin embargo, estas medidas presentan la desventaja de ser puntuales (tomadas en una superficie pequeña de terreno) a diferencia de la información que ofrecen las imágenes con distribución espacial completa.

También hay trabajos basados en imágenes de alta resolución espacial como las de Landsat, Spot etc. Es el caso de los estudios realizados por Li et al., (2014) o Wang et al., (2015), donde en estos casos, la principal limitación está en resolución temporal que se consigue, siendo habitual tener que recurrir al uso combinado de imágenes de diferentes sensores, lo que suele requerir una calibración previa de los datos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivos académicos:**

- Puesta en práctica de las competencias adquiridas durante el proceso formativo del “Máster Universitario en Tecnologías de la Información Geográfica para la Ordenación del Territorio: SIG y Teledetección.
- Colaborar en un equipo multidisciplinar y asimilar las rutinas dentro de un trabajo de investigación.

### **2.2. Objetivos científicos:**

El objetivo principal del trabajo es estudiar la utilidad de series temporales de índices de vegetación derivados de imágenes satélite para extraer información fenológica en parcelas de cultivo.

Para obtener este objetivo se han propuesto los siguientes sub objetivos:

- 1- Inter-calibrar la información espectral obtenida de diferentes sensores para crear series temporales.
- 2- Caracterizar la fenología de los diferentes cultivos y analizar la sensibilidad de las series temporales utilizadas.

## **3. ÁMBITO DE ESTUDIO**

### **3.1. Localización y características generales del área de estudio**

El ámbito de actuación en el que se desarrolla el trabajo es la zona regable de La Violada localizada en el valle medio del Ebro (noreste de España), en la provincia de Huesca a 18 km de la capital y ocupa la parte baja de la cuenca del Bco. de La Violada. Abarca una superficie de 5234 ha, de las cuales el 91% (4747 ha) pertenece a la Comunidad de Regantes de Almudévar (CRA), el 7% a la Comunidad de Tardienta (382 ha) y el 2% restante a la de Gurrea (105 ha).

Según Barros (2011) para el periodo 1986-2008 el clima de esta zona es de tipo mediterráneo, con una precipitación media anual de 430 mm, con 72 días de lluvia por año y distribuidas a lo largo de todo el año siendo los meses más lluviosos abril y mayo, en primavera y octubre, y noviembre, en otoño. Además, presentan gran variabilidad interanual. La temperatura media anual de 13.8 °C, con una oscilación térmica de 17.7 °C dentro del año. Las temperaturas más bajas se presentan en diciembre, aunque en este periodo no se alcanzaron temperaturas mínimas medias inferiores a 0 °C. El mes de julio es el que presenta las temperaturas más altas superando la temperatura máxima media los 30 °C. A diferencia de las precipitaciones, las temperaturas presentan una baja variabilidad interanual.

En general predominan los suelos de textura limosa y franco limosa, siendo más profundos, de textura fina y sin elementos gruesos en los fondos de valle y de textura más gruesa, con menor profundidad y mayor volumen de elementos gruesos en los glaciares de la parte norte-centro de la zona regable.

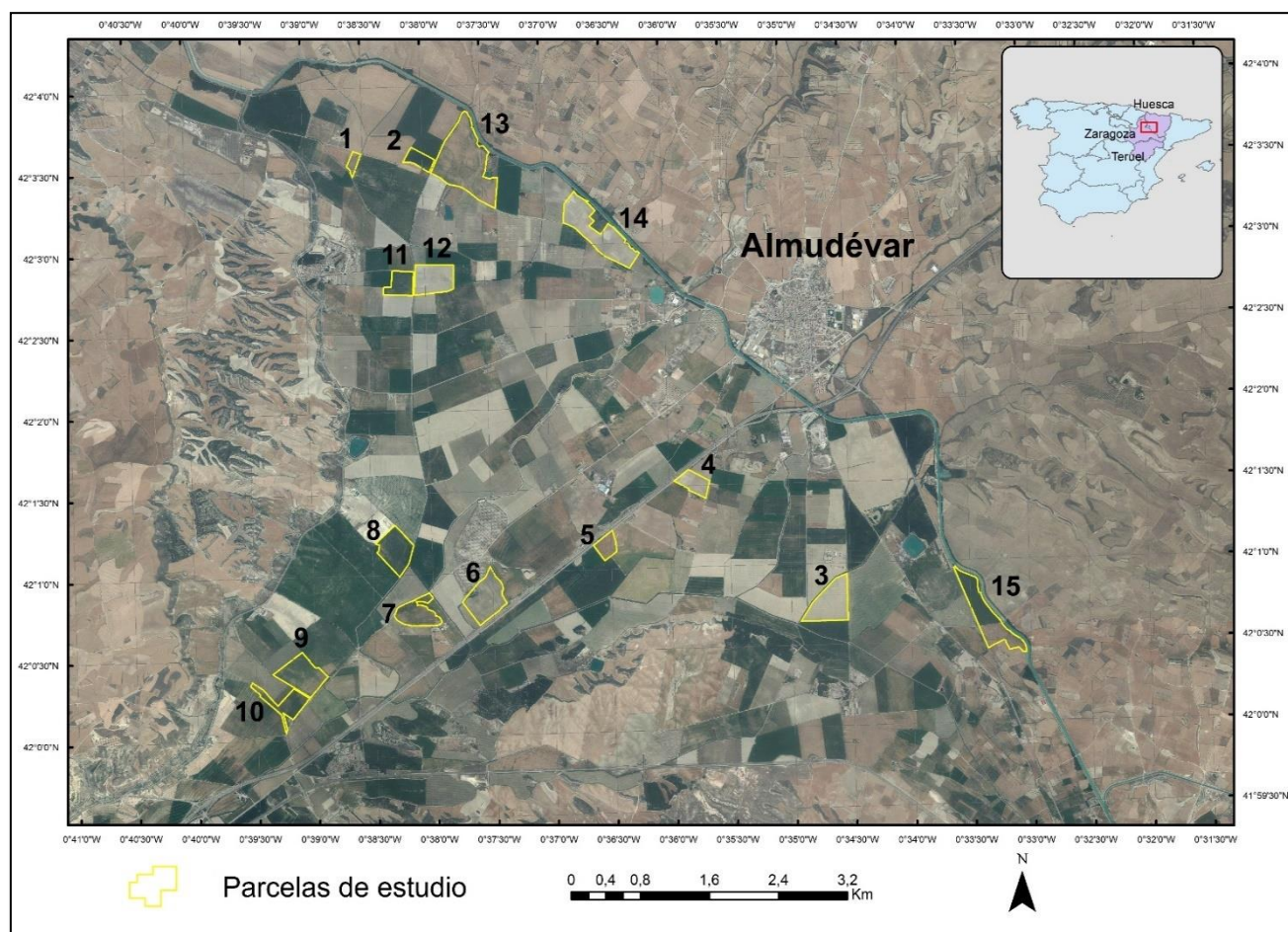
La zona regable se encuentra entre los canales de Monegros, La Violada y Santa Quiteria y forma parte de la Comunidad General de Riegos del Alto Aragón dentro del sistema de riego de Monegros I a la Confederación Hidrográfica del Ebro y a la Junta de Explotación N° 14 del Gállego y Cinca. Se riega con aguas del río Gállego y la captación de las aguas se realiza en la Presa de Ardisa de la que se deriva el agua al Pantano de la Sotonera del que nace el Canal de Monegros.

El sistema de drenaje consiste en una densa red de desagües y dos azarbes principales: Valsalada y Artasona que se juntan formando el barranco de La Violada. Debido la existencia de una capa de arcillas impermeables en el subsuelo (Faci et al., 1985), las aguas de retorno del riego se recogen íntegramente en el barranco de La Violada que cuenta con una estación de aforo en el punto D-14 (estación de aforos EA 230 de la CHE).

En los años 2008 y 2009 se produjo la transformación del regadío de la Comunidad general de Regantes de Almudévar que cuenta con un nuevo sistema de riego operado por telecontrol donde domina la cobertura fija enterrada, y con dos balsas de regulación, Violada y Abariés. El 92% de la zona regable se riega por aspersión y el 8% por inundación.

Más información sobre la zona regable de La Violada y su transformación puede consultarse en Torres (1983), Faci et al., (1985); Faci et al., (2000); Playán et al., (2000); Isidoro et al., (2004) y en los trabajos recientes sobre balances hídricos y contaminación difusa por sales y nitrato (Barros, 2011a, 2011b, CHE – Confederación Hidrográfica del Ebro 2009, 2011 y 2014).

Dentro del polígono de la zona regable de La Violada, el estudio se centra más concretamente en un total de 15 parcelas con tamaños y morfologías muy diferentes. En la Figura 1 se puede observar la localización exacta de estas parcelas de estudio dentro del polígono de riego de La Violada. Los criterios seguidos para la selección de las parcelas han sido: tamaño suficientemente grande (superiores a 2 ha), representación variada de cultivos y disponibilidad de datos sobre la fenología y producción.



**Figura 1.** Localización de las parcelas de estudio en el Polígono de riego de La Violada (Almudévar, Huesca, España)

### 3.2. Principales cultivos y su fenología

Los cultivos más extendidos en la zona regable de la Violada son el maíz y la alfalfa, seguidos de los cereales de invierno. Tras la modernización en 2008 y 2009 las dobles cosechas son habituales aumentando con los años la superficie dedicada a ellas. Otros cultivos menos extendidos que normalmente entran en las dobles cosechas son girasol, guisante, raigrás y veza.

Los cultivos de verano, maíz y girasol se suelen sembrar hacia mediados de abril y su cosecha comienza a partir de mediados de octubre, pudiéndose prolongar hasta finales de noviembre. Si son cultivos de segunda cosecha, la siembra suele retrasarse hasta junio.

Los cereales de invierno, cebada y trigo se siembran desde mediados de octubre a diciembre y su cosecha suele ser pasada la primera semana de junio. El trigo suele ir con unos 10 días de retraso respecto a la cebada.

La alfalfa es un cultivo plurianual que se mantiene unos 5 años en la parcela. Se suele sembrar entre septiembre/octubre y abril y se le dan 5 o 6 cortes al año.

Se dispone de información recopilada en parcelas de estudio referente a un seguimiento de la fenología del cultivo, esta procede de un intenso seguimiento de los cultivos en campo, realizado desde el año 2015 por personal del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria (CITA) y continuado durante la realización de este trabajo.

La información sobre el cultivo, variedad, estado general, tamaño y número de hojas, estado fenológico, etc., ha sido tomada periódicamente siempre en la misma zona de las parcelas de estudio, zona referenciada con GPS. En cada visita se han adquirido fotografías para documentar el estado del cultivo. Además, esta información en campo se ha completado con encuestas a los agricultores y se han tomado datos de producción cosechando manualmente 2m<sup>2</sup> de cultivo en la misma zona donde se ha realizado el seguimiento fenológico.

En la Tabla 1, y a modo de resumen, se muestran las parcelas de estudio con los cultivos registrados para los años 2015 y 2016 en los que se ha realizado un seguimiento de su fenología.

**Tabla 1.** Parcelas de estudio y cultivos en los que se ha realizado el seguimiento fenológico (2015 – 2016)

Parcela	Cultivo 2015	Cultivo 2016
1	Cebada	Cebada
2	Maíz	Maíz
3	Maíz	Maíz
4		Girasol
5		Maíz
6	Maíz	Trigo
7	Cebada	
8	Trigo	Maíz
9	Girasol	Cebada y maíz
10	Girasol	Trigo
11		
12	Maíz	
13	Cebada y girasol	Cebada
14	Maíz	Cebada y girasol
15	Maíz y cebada	Maíz

En el Anejo 1, Tablas 1, 2 y 3, se muestran los datos relacionados con la información de la fenología recopilada sobre los cultivos en las parcelas de estudio. A continuación, se describe la escala utilizada en el seguimiento fenológico y se resumen las características fenológicas de las parcelas de estudio.

## • Cebada y trigo

Según la escala de Zadocks et al. (1974), el ciclo del cultivo de la cebada y el trigo se divide en nueve fases hasta que alcanza la madurez del grano (Figura 2).

La fecha de siembra de los cultivos de invierno, cebada y trigo, se da en torno a mediados de noviembre exceptuando alguna parcela de cebada, como por ejemplo el número 13, en la que la siembra se realizó un mes más tarde (Anejo 1, Tabla 1).

La fase de emergencia suele darse aproximadamente alrededor dos semanas después de la siembra. Ya a partir del 10 de marzo es cuando se produce el encañazón y a partir de mitad de abril el llamado estado de bota. El espigazón aparece a finales de abril o principios de mayo y muy pocos días después se produce la antesis del cultivo.

En torno a la segunda semana de mayo comienza a producirse el inicio de llenado de grano y una semana más tarde llega el fin de llenado de grano y la madurez fisiológica del cultivo. Las fechas de la cosecha del agricultor de estos cultivos de invierno son variadas, aunque siempre en el mes de junio y a partir sobre todo de la primera semana.



**Figura 2.** Fases fenológicas de los cultivos de invierno: trigo y cebada. (Fuente: Fichas de Zadocks y al. (1974))

## • Maíz

La escala utilizada ha sido la de Bolaños y Edmeades (1993), donde el ciclo del cultivo del maíz se divide en ocho etapas hasta que alcanza la madurez fisiológica (Figura 3).

En cuanto al cultivo de maíz, la siembra se produce a mitad de abril, exceptuando en la parcela 15 que se produce en junio (13 días después de la cosecha del anterior cultivo, en este caso cebada).

La emergencia se produce 5 días después de la siembra y el llamado final de la fase juvenil en torno entre el 10 y el 15 de julio. La fase denominada VT en la cual la última rama de la panícula es completamente visible se suele dar una semana terminada el final de la fase juvenil.

La antesis o floración masculina (antesis R0), donde el polen se comienza a arrojar, se da muy pocos días después de la fase VT (en torno a dos días después). La floración femenina (R1), donde son visibles los estigmas, se produce de 3 a 5 días después.



Aproximadamente entre 5 y 7 días después de la fase fenológica anterior, se produce etapa de ampolla (R2) y ya en la última semana de agosto la etapa dentada (R5), donde la parte superior de los granos se llena con almidón sólido. La madurez fisiológica del maíz la encontramos en torno al décimo día de septiembre cosechando el cultivo algunos agricultores en octubre y otros en noviembre.



- VE: germinación - emergencia
- VN: estado vegetativo,
- R1: floración femenina,
- R2: etapa de ampolla,
- R3: etapa de leche,
- R4: etapa de masa,
- R5: etapa de dentado,
- R6: madurez fisiológica,
- Número de hojas, (longitud y ancho de la hoja más grande y más pequeña),
- Altura de la planta.

**Figura 3.** Fases fenológicas del maíz. (Fuente: Fichas de Bolaños y Edmeades (1993))

#### • Girasol

La escala utilizada es la de Schneiter y Miller (1981) como se muestra en la Figura 4. El girasol en las parcelas de estudio es segundo cultivo (doble cosecha). La fecha de siembra del cultivo del girasol en las parcelas de estudio es a finales de junio exceptuando el caso de la parcela número 13 que se sembró un mes antes. La iniciación foliar (VE) se producirá alrededor de 10 días después de la siembra del cultivo.

El fin de la fase juvenil del cultivo se produce a finales del mes de julio y en la fase de crecimiento y desarrollo de flores (R1) la primera semana del mes de agosto. La fase de floración (R5) se produce sobre el 20 de agosto y la madurez fisiológica (R9) se alcanza ya el día 10 de octubre. La cosecha del girasol en las parcelas estudiadas se produjo del 15 al 25 de octubre.



- VE: emergencia
- VN: estado vegetativo,
- R5: antesis,
- R6: llenado de la semilla,
- R9: madurez fisiológica,
- Número de hojas.

**Figura 4.** Fases fenológicas del girasol. (Fuente: Fichas de Schneiter y Miller (1981))

## 4. IMÁGENES SATELITALES

### 4.1. Satélites-sensores utilizados

A la hora de elegir el tipo de imágenes a utilizar, se ha tenido en consideración la morfología de las parcelas de cultivo, su superficie, la disponibilidad, así como el coste de adquisición de las mismas.

Atendiendo a todo lo anterior se ha optado por la utilización de imágenes de Landsat y Sentinel, las cuales se encuentran a libre disposición y se adaptan perfectamente a la zona de estudio. Dentro de los diferentes productos que ofrece el programa Landsat, se ha optado por las imágenes proporcionadas por el último satélite, el Landsat 8. En cuanto a Sentinel se ha optado por las imágenes de Sentinel-2.

Además, y dado que en el Plan Nacional de Teledetección (PNT) se dispone de imágenes de Deimos-1 se ha decidido contemplar también su posible uso para así poder completar una serie temporal de imágenes que permita definir adecuadamente las series fenológicas de los cultivos en la zona de estudio.

- **Landsat 8 sensor OLI**

La misión Landsat ha captado y almacenado datos ininterrumpidamente prácticamente a lo largo de más de 40 años y con una cobertura global. Es probablemente la misión más completa de observación de la Tierra a nivel temporal y geográfico con más de 200 satélites y más de 500 sensores.

El Landsat 8 fue lanzado el 11 de febrero de 2013 y se encuentra plenamente operativo. Sus características orbitales son similares a sus precedentes, ya que se trata de un satélite heliosíncrono a 705 km de altura orbital. Su periodo de revisita es de 16 días.

El satélite Landsat 8 incorpora dos instrumentos de barrido: Operational Land Imager (OLI), en el rango óptico del espectro, y Thermal Infrared Sensor (TIRS), un sensor térmico infrarrojo.

El sensor OLI proporciona información de nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las bandas de 1 a 7 y 9. La resolución para la banda 8 (pancromática) es de 15 metros (Tabla 2). El tamaño aproximado de la escena es de 170 km de norte-sur por 183 kilómetros de este a oeste (106 km por 114 km).

**Tabla 2.** Relación de bandas para una imagen de Landsat 8. (Fuente: USGS, 2013)

Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)  February 11, 2013	Bandas	longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
	Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
	Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
	Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
	Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
	Banda5 – Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Banda 8 - Pancromático	0.50 - 0.68	15
	Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	*Banda 10 – Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
	*Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

- **Sentinel-2 MSI**

La misión Sentinel-2 es una constelación de vigilancia terrestre de dos satélites que proporcionan imágenes ópticas de alta resolución. El Sentinel-2A fue lanzado el 23 de junio de 2015 y está planificado el lanzamiento de Sentinel-2B en 2017. Son dos satélites idénticos de órbita helio-sincrónica que funcionan de forma simultánea por etapas de 180° en una órbita sincronizada con el sol a una altitud media de 786 km. La inclinación de la órbita es 98,62°. La misión proporciona una cobertura global de la superficie terrestre cada 10 días con un satélite y se reducirá a 5 días con el lanzamiento del Sentinel-2B lo que supondrá un gran avance en el seguimiento de la fenología de cultivos.

El satélite Sentinel-2 tiene un escáner multispectral con 13 bandas (VNIR Y SWIR) con una resolución espacial de 10, 20 y 60 m y el ancho de pasada de la imagen es de 290 kilómetros. Lo interesante de esta misión es su enfoque especial hacia la agricultura y su interoperabilidad con el programa Landsat. En la Tabla 3 se observa la distribución de las bandas con su longitud de onda y su resolución espacial.

**Tabla 3.** Distribución de las bandas en Sentinel-2 (Fuente: USGS, 2013)

<b>Bandas Sentinel-2</b>	<b>Longitud de onda central (micras)</b>	<b>Resolución (m)</b>
Banda 1 - aerosol costero	0,443	60
Band 2 - Azul	0,490	10
Banda 3 - Verde	0,560	10
Banda 4 - Rojo	0,665	10
Banda 5 - rojo vegetación Edge	0,705	20
Banda 6 - rojo vegetación Edge	0,740	20
Banda 7 - rojo vegetación Edge	0,783	20
Banda 8 - NIR	0,842	10
8A Band - rojo vegetación Edge	0,865	20
Banda 9 - El vapor de agua	0,945	60
Banda 10 - SWIR - Cirrus	1,375	60
Banda 11 - SWIR	1,610	20
Banda 12 - SWIR	2,190	20

- **Deimos-1**

Este satélite está concebido para obtener imágenes de la Tierra de una resolución espacial suficientemente buena para el estudio detallado de la cubierta vegetal terrestre, pero con gran amplitud de campo visual.

El satélite Deimos-1 fue lanzado el 29 de julio de 2009. Es el primer satélite español, proporciona imágenes a resolución de 20m en tres bandas (verde, rojo e infrarrojo cercano) a 8/10 bits. Sus longitudes de banda son de 0.520-0.600µm (G), 0.630-0.690µm (R), 0.770-0.900µm (NIR) con una resolución de 20 m. El satélite cuenta con un amplísimo ancho de barrido (650 km). Las bandas del sensor Deimos-1 difieren poco de los de Landsat-8 y Sentinel-2.

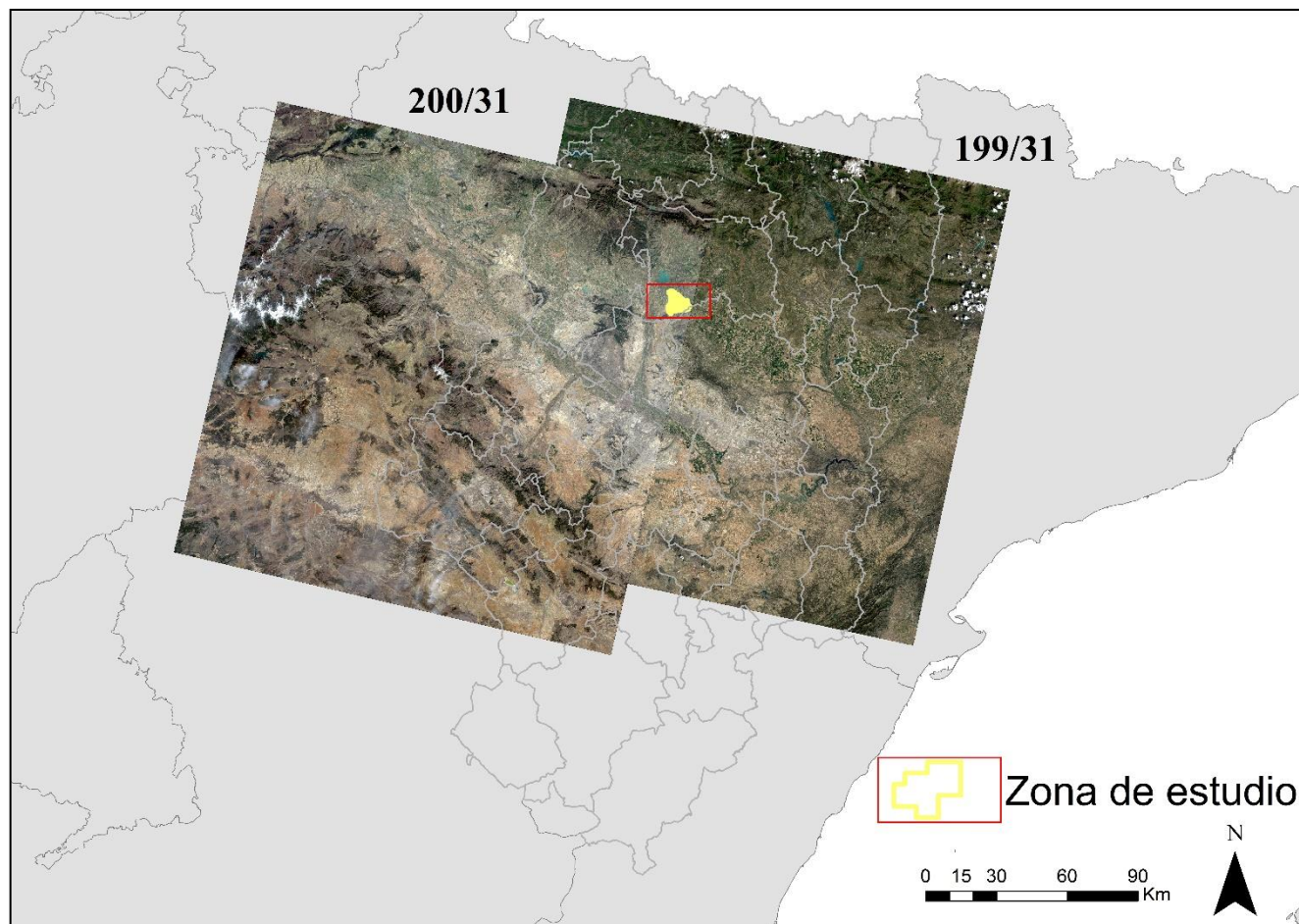
La disponibilidad de las imágenes no es de libre acceso para el usuario, aunque ELECNOR DEIMOS Imaging proporciona al IGN datos Deimos-1 para PNT entregando coberturas mensuales de España en media resolución.

Las bandas que van a ser utilizadas para el presente estudio (visible; azul, verde, rojo y NIR) responden a unos anchos de banda muy similares entre estos sensores elegidos.



## 4.2. Disponibilidad y selección de imágenes

La zona de estudio se encuentra en la zona de solape de las escenas Landsat Path/Row 199/31 o 200/31 (Figura 5) lo que permite tener una mayor continuidad y cantidad de imágenes de satélite. Utilizando para ello en el caso de Landsat el servidor de descarga del USGS ( <http://glovis.usgs.gov/>).



**Figura 5.** Grado de cobertura de la zona de estudio ofrecido por las escenas 199/31 y 200/31 de Landsat

Con las imágenes del satélite Sentinel-2, la escena utilizada es la 30TXM, abarcando con esta escena la totalidad del área de estudio. Las imágenes han sido descargadas del servidor Sentinels Scientific Data Hub del programa Copernicus de la ESA (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>).

Por último, las imágenes del satélite Deimos-1 han sido descargadas del servidor del Plan Nacional de Teledetección (PNT). La disponibilidad de las imágenes no es de libre acceso para el usuario, aunque ELECNO DEIMOS Imaging proporciona al IGN datos Deimos-1 para PNT entregando coberturas mensuales de España en media resolución.

Así pues, se ha analizado la disponibilidad de imágenes de los diferentes satélites para el periodo comprendido entre octubre del año 2014 (inicio de ciclo de cereales de invierno), hasta mediados de agosto de 2016 (limitado por el tiempo asignado para el desarrollo el trabajo de máster).

Existen un total de 42 imágenes para la escena 199-31 y 41 imágenes para la escena 200-31 en el periodo comprendido entre octubre de 2014 y agosto de 2016.

No todas las imágenes disponibles son óptimas para el estudio, ya que algunas presentan una cobertura de nubes elevada o concentrada en la zona de estudio. Si se considera este aspecto, el resultado final en cuanto a imágenes libres de nubes y por lo tanto susceptibles de ser analizadas es el que se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Disponibilidad de imágenes Landsat 8 válidas para el estudio

<b>199-31</b>	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total general
2014										1		1	2
2015			1	2	2	1	2	2	1		1		12
2016				1		2	1	1					5
<b>Subtotal</b>			<b>1</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>19</b>
<b>200-31</b>	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total general
2014										1			1
2015		1	1	1	1	2	1	1	1		1		10
2016	1	1	1				1						4
<b>Subtotal</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>		<b>15</b>

De las 40 imágenes disponibles para el Path/Row 199/31, únicamente 19 de ellas no presentan nubes o estas se encuentran localizadas en alguna sección de la imagen que no afecta al área de estudio. Mientras que para el Path/Row 200/31, pasan de 41 imágenes disponibles a 15 válidas para el estudio.

En cuanto a la disponibilidad de imágenes del satélite Sentinel-2, hay una ausencia de imágenes hasta agosto de 2015 debido a que este satélite se puso en órbita el 23 de junio de 2015.

Existen un total de 45 imágenes para la escena 30TXM en el periodo de estudio. Los meses de abril y mayo de 2016 son los que aportan mayor número de imágenes.

De todas las imágenes disponibles para el periodo de estudio del satélite Sentinel-2, únicamente 11 de ellas no presentan nubes o estas se encuentran localizadas en alguna sección de la imagen que no afecta al área de estudio y, por tanto, serán las válidas para nuestro estudio (Tabla 5).

**Tabla 5.** Disponibilidad de imágenes Sentinel-2 válidas para el estudio

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total general
2014													
2015								1				1	2
2016	1			1	3	1	2	1					9
<b>Subtotal</b>	<b>1</b>			<b>1</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>				<b>1</b>	<b>11</b>

La posibilidad de acceso a imágenes satelitales del sensor Deimos-1 ha estado ligada a la oportunidad de la descarga de dichas imágenes en el servidor del Plan Nacional de Teledetección (PNT) estando disponibles para Aragón en el servidor del PNT, en el periodo de realización del trabajo únicamente las del año 2015. Así pues, las imágenes disponibles válidas para el presente estudio se recogen en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Disponibilidad de imágenes Deimos-1 válidas para el estudio

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total general
2014													
2015					2		2	1	2				7
2016													
<b>Subtotal</b>					<b>2</b>		<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>				<b>7</b>

La aportación de imágenes de cada uno de los satélites es la que se muestra en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Número de imágenes válidas disponibles según satélite (2014-2016)

	Landsat 8 (199-31)	Landsat 8 (200-31)	Sentinel-2 (30TXM)	Deimos-1	Total general
oct-14	1	1			2
nov-14					0
dic-14	1				1
ene-15					0
feb-15		1			1
mar-15	1	1			2
abr-15	2	1			3
may-15	2	1		2	5
jun-15	1	2			3
jul-15	2	1		2	5
ago-15	2	1	1	1	5
sep-15	1	1		2	4
oct-15					0
nov-15	1	1			2
dic-15			1		1
ene-16		1	1		2
feb-16		1			1
mar-16		1			1
abr-16	1		1		2
may-16			3		3
jun-16	2		1		3
jul-16	1	1	2		4
ago-16	1		1		2
<b>Total general</b>	<b>19</b>	<b>15</b>	<b>11</b>	<b>7</b>	<b>52</b>

Como puede observarse, el satélite Landsat 8, con ambas escenas, es el que más imágenes aporta al estudio, seguido de Sentinel-2 y por último Deimos-1. Tres meses destacados en rojo (noviembre de 2014, enero de 2015 y octubre de 2015) son aquellos en los que no existe disponibilidad de imágenes válidas debido al principal problema de que las nubes no permitían un análisis óptimo.

Esto refleja las limitaciones que se pueden tener en cuanto a la disponibilidad de estas imágenes sobre todo para los meses más nubosos, como pueden ser los de las estaciones de primavera, donde a pesar de contar con diferentes sensores a veces es difícil conseguir series temporales lo suficientemente densas para realizar el estudio deseado.

### 4.3. Preparación de las imágenes y obtención índices espectrales

Las imágenes de satélite presentan alteraciones en la localización y en la radiometría de los píxeles que las componen, provocadas por la rotación y la curvatura terrestre, distorsiones originadas por la plataforma, el sensor o por condiciones ambientales. Por ello, es necesario realizar pretratamientos a las imágenes con objeto de solucionar estas alteraciones.

El paso previo a la corrección de las imágenes en el caso de las Landsat 8 es generar una imagen multibanda con las bandas suministradas. Para Landsat la imagen se genera con las bandas 1-7 del sensor OLI, excluyendo las bandas cirrus y pancromática. En el caso de Sentinel, se han elegido las cuatro bandas que contienen una resolución de 10 m; azul, verde, rojo e infrarrojo cercano. Con las imágenes Deimos, la imagen multibanda contiene las tres bandas que proporciona: verde, rojo e infrarrojo cercano. Todos los procesos descritos en el apartado 4.3 se han realizado mediante el software Erdas Imagine 2014.

#### 4.3.1. Corrección geométrica

La corrección geométrica es el proceso que elimina los errores de localización de los píxeles sin modificar los niveles digitales de los mismos, solo su posición o coordenadas. Las correcciones geométricas son necesarias realizarlas básicamente debido a dos motivos:

- A las variaciones espaciales ocurridas en el proceso de captura de la información e inherentes al movimiento del sensor (aleteo, cabeceo, variaciones en altura y velocidad, etc.).
- Por necesidad de ajustar, dicha información, a un sistema de referencia determinado (sistema geodésico, proyección cartográfica, etc.).

Las imágenes del presente estudio ya están disponibles corregidas geométricamente y georreferenciadas, aunque en algunos casos en un sistema de proyección diferente por lo que ha sido necesario realizar una reproyección a ETRS89/UTM Zona 30N.

#### 4.3.2. Corrección radiométrica

Siguiendo a Pérez et al., (2016), la señal de radiancia que capta un sensor óptico depende de:

- Las propiedades reflectivas de los objetos-cubiertas de la superficie, las cuales dependen de su composición físico-química y de su estructura. Además, en las respuestas reflectivas puede existir influencia de la dispersión del entorno.
- La influencia de la atmósfera, ya que afecta a la transmisividad en los flujos descendentes y ascendentes, ocasiona fenómenos de absorción, dispersión y emisión. Estos efectos dependen en gran medida de las condiciones particulares que presenta la atmósfera en un momento dado.
- Configuración del sensor.
- Geometría de la iluminación-observación, dependiendo de la hora del día, del momento del año, del relieve (pendiente y orientación) y del ángulo de observación del sensor la señal captada por el sensor será diferente.

Para corregir estas anomalías que existen en la radiancia captada por el sensor se aplica la corrección radiométrica a la imagen. La corrección radiométrica es conjunto de técnicas que se aplican para modificar los ND originales de una imagen de satélite con objeto de acercarlos a los que se registrarían si la recepción fuera ideal (Chuvieco, 2010).

Esta corrección radiométrica es necesaria para poder desarrollar modelos empíricos de estimación de parámetros biofísicos continuos, para realizar estudios multitemporales o mejorar la calidad en la clasificación digital. El proceso de cálculo de la reflectividad espectral a partir de las imágenes codificadas en ND, consta de los siguientes pasos:

Se elimina el efecto de la dispersión atmosférica. En nuestro estudio se ha elegido para hacerlo el método del objeto oscuro de Chávez (1996). Para aplicar este modelo se requieren cubiertas con valores de radiancia espectral cero o próximas a cero que corresponden a zonas de aguas muy profundas o sombras. A cada banda de la imagen se le resta el ND de dichas cubiertas.

### *Cálculo de la reflectividad aparente*

La reflectividad aparente expresa la relación existente entre la energía incidente y la energía reflejada. Su valor varía entre 0 (la superficie no refleja nada) y 1 (la superficie refleja toda la energía electromagnética que le llega).

La relación entre los ND de la imagen y la radiancia espectral en cada banda queda definida por la siguiente expresión:

$$L\lambda = G * ND + B$$

Los ND junto con los Gain y Bias propios de cada sensor (proporcionado dentro de los archivos de cabecera que se distribuyen junto con cada imagen) nos permiten “reescalar” los ND originales a radiancia. Posteriormente, se obtiene la reflectividad aparente de la superficie terrestre mediante el modelo simplificado, indicado en Chuvieco (2010).

Las características de la zona de estudio presentan una orografía poco acentuada con pendientes bajas o incluso nulas, ya que son superficies destinadas a cultivos agrícolas. Es por eso, que en este trabajo se ha considerado no aplicar la normalización topográfica ya que puede originar la distorsión de la información espectral que contiene la imagen ocasionando alteraciones en la respuesta espectral de las cubiertas. Para la realización de estas correcciones se ha utilizado el módulo Model Maker de Erdas Imagine.

Los procesos anteriormente descritos se han aplicado a las escenas de Landsat y Deimos. En el caso de las imágenes Sentinel-2 solo ha sido necesario aplicarles la corrección atmosférica ya que se proporcionan ya en reflectividades. El método elegido ha sido también el objeto oscuro de Chávez (1996) para así seguir el mismo método que con las otras escenas.

#### 4.3.3 Reproyección, recorte y ajuste espacial de la imagen

El sistema de coordenadas elegido en este trabajo es ETRS89/UTM Zona 30N. En el caso de Landsat y Sentinel las imágenes se suministran en WGS 1984, por lo que se realiza una reproyección al sistema de coordenadas elegido. Deimos ya vienen en el sistema elegido.

Una vez proyectadas todas las imágenes al mismo sistema de coordenadas y corregidas radiométricamente, se realiza un recorte de las mismas que incluya la zona de estudio.

Además, es importante un buen ajuste entre las diferentes imágenes de los distintos sensores. Para conseguir que todos los píxeles casen exactamente igual cuando provienen de diferentes imágenes de distintos sensores, se realiza un ajuste del recorte ajustando las coordenadas en los casos que haya sido necesario.

#### 4.3.4 Obtención de índices espectrales

La evaluación cuantitativa de la vegetación verde constituye una de las mejores aplicaciones de la percepción remota para el manejo de los recursos ambientales y la ayuda en la toma de decisiones. Esta herramienta, muy útil en Teledetección, es la obtención de índices espectrales de vegetación que Gilabert et al. (1997) los definió como parámetros calculados a partir de valores de reflectividad a distintas longitudes de onda y que pretende extraer de los mismos la información relacionada con la vegetación, minimizando la influencia de perturbaciones como las debidas al suelo y a las condiciones atmosféricas.

El índice de vegetación ideal ha sido descrito por Jackson et al. (1983) como “aquel” particularmente sensible a la cubierta vegetal, insensible al brillo y color del suelo y poco afectado por la perturbación atmosférica, los factores medioambientales y las geometrías de la iluminación y de la observación. Los índices elegidos para el presente estudio y mostrar el desarrollo o vigor vegetal son el NDVI, SAVI y VARI.

- *Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index)*

El NDVI es el índice de vegetación más conocido y usado. Este índice fue introducido con el objetivo de separar la vegetación del brillo que produce el suelo (Rouse et al., 1974). Este índice se basa en el peculiar comportamiento radiométrico de la vegetación, relacionado con la actividad fotosintética y la estructura foliar de las plantas, permitiendo determinar la vigorosidad de la planta.

Como la mayoría de los índices de vegetación combina la banda roja y la infrarroja cercana y donde se produce el contraste espectral que la vegetación sana presenta en la banda del rojo, donde se da baja reflectividad, y la del infrarrojo cercano, donde la reflectividad es alta (Chuvieco, 2010).

El cálculo del NDVI implica el uso de una simple fórmula con dos bandas, el Infrarrojo Cercano (NIR) y el rojo (RED):

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$$

Toma valores entre -1 y 1. En general puede decirse que la nieve, agua y nubes suelen presentar valores próximos o menores a 0; el suelo valores entre 0 y 0,2 y la vegetación valores entre 0,2 y 0,8.

Se ha elegido este índice por ser el más aplicado y de referencia en numerosos trabajos como el aquí presentado. La razón fundamental es su sencillez de cálculo y disponer de un rango de variación fijo (entre -1 y +1), lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes. Algunos ejemplos de trabajos relacionados con la temática que nos ocupa que usan NDVI son autores como De la Casa et al. (2007) o Beck et al., (2006)-

- *Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)*

El Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) es propuesto por Huete (1988). Está preparado para minimizar los efectos del fondo de suelo sobre la señal de vegetación al incorporar un factor L (ajuste del suelo constante en el denominador de la ecuación NDVI). Este factor L varía con las características de reflectancia del suelo (Ej.: color y brillo).

El factor L elegido depende de la densidad de la vegetación que uno desea analizar. Para un nivel de densidad muy bajo, Huete (1988) sugiere usar un factor L de 1,0; para un nivel intermedio, 0,5 y para uno alto, 0,25. En nuestro caso se ha optado por el uso de un factor intermedio de 0,5.

$$\text{SAVI} = [(\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED} + L)] (1 + L)$$

Se ha elegido este índice como alternativa al NDVI, ya que el NDVI tiene el inconveniente de ser sensible a las propiedades ópticas del suelo sobre el que se sitúa la vegetación, lo que limita su potencial de discriminación de la vegetación. Por ejemplo, en una zona con baja densidad de vegetación, la reflectividad de un pixel en la banda infrarroja y en la banda roja, vendrán determinados fundamentalmente por el suelo, con una pequeña variación debida a la presencia de la vegetación. El resultado es que un índice de vegetación NDVI de esa zona dará resultados muy similares al del suelo desnudo y sería difícil detectar la presencia de vegetación. (Muñoz, 2015).

Por este motivo se ha elegido el índice SAVI, ya que incorpora y se basa en el uso de una línea del suelo para así determinar su influencia y tratar de separar la información entre la vegetación y el suelo. Este índice sería más adecuado que el NDVI en fases iniciales del cultivo donde la influencia del suelo es notable.

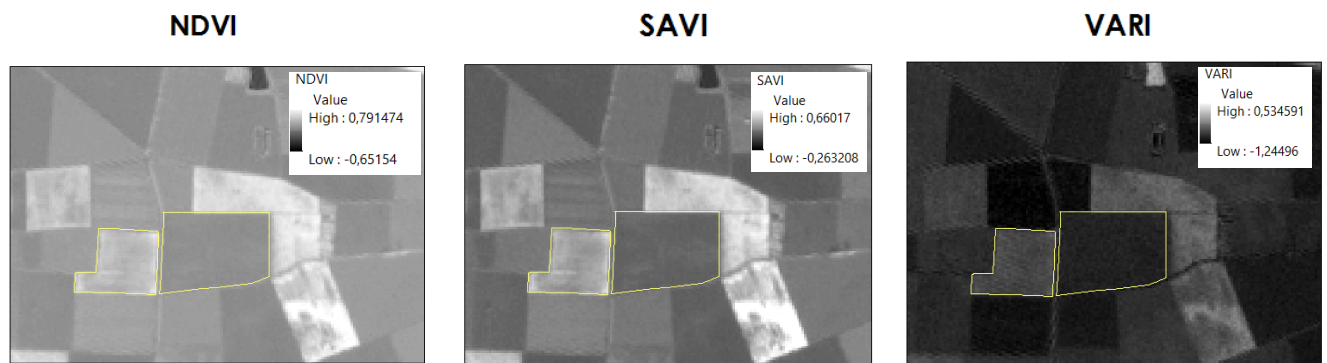
- *Visible Atmospheric Resistant Index (VARI)*

El índice VARI (Visible Atmospheric Resistant Index) es el propuesto por Gitelson et al. (2002), diseñado para eliminar las perturbaciones atmosféricas. Su formulación es la siguiente:

$$\text{VARI} = (\text{GREEN} - \text{RED}) / (\text{GREEN} + \text{RED} - \text{BLUE})$$

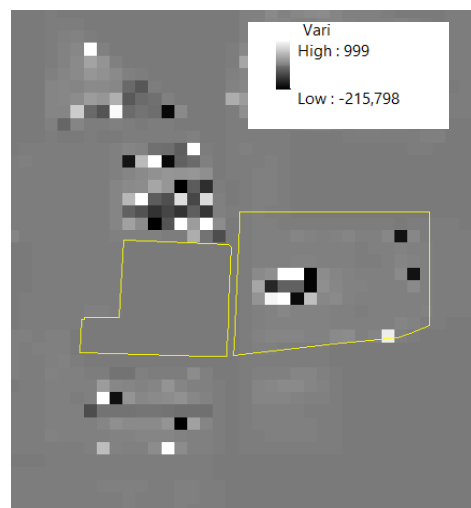
Se ha elegido este índice debido a que cuando los cultivos están en pleno desarrollo vegetativo, el NDVI y el SAVI pueden llegar a saturar en valores elevados de dichos índices, no siendo sensibles a los cambios en biomasa en moderadas y altas densidades de vegetación.

El VARI tiene en cuenta las perturbaciones atmosféricas ya que fue diseñado para introducir una corrección atmosférica y no presenta los problemas de saturación mencionados (Bisquert et al., 2009) por lo cual puede ser más conveniente en etapas de pleno desarrollo vegetativo del cultivo. Este índice se puede utilizar para analizar los cultivos en todas las etapas del crecimiento. En la Figura 6, se muestra un ejemplo de la extracción de los tres índices de vegetación en una imagen Sentinel y sus rangos de valores.



**Figura 6.** Ejemplos de índices de vegetación NDVI, SAVI y VARI en una imagen Sentinel-2

En la visualización de este índice se ha observado que en algunas imágenes Landsat existen artefactos con valores anómalos del índice VARI (valores excesivamente grandes o excesivamente pequeños). Un ejemplo de estas imágenes afectadas por estos píxeles erróneos o artefactos es el que se muestra en la Figura 7 que como vemos llegan a afectar incluso en algunas de las parcelas de estudio.



**Figura 7.** Ejemplo de visualización del índice de vegetación VARI con píxeles erróneos o artefactos



## 5. COMPARACIÓN, RELACIÓN Y CALIBRACIÓN DE LOS INDICES DE VEGETACION DERIVADOS DE LANDSAT, SENTINEL Y DEIMOS

Debido a la existencia de cada vez un mayor número de sistemas de observación y sensores de satélites para la Tierra, la aplicación conjunta de los datos de teledetección adquiridos de varios sensores es muy importante y eficaz para el seguimiento de los cambios del medio ambiente y análisis de factores biofísicos.

Como ya se ha indicado en la introducción de este trabajo, la calibración entre múltiples sensores se convierte en indispensable para el uso complementario de sus imágenes en la realización de series temporales de datos. Para la realización de estas calibraciones se ha utilizado los softwares Arcgis 10.2 y Excel.

### 5.1. Landsat 8 escena 199/31 frente a escena 200/31

Al haber incorporado al estudio imágenes procedentes de ambas escenas del satélite Landsat 8 y en la escena 200/31 ser más complicado encontrar cuerpos oscuros para la corrección atmosférica, se decide realizar un calibrado entre las dos escenas del mismo satélite con objeto de analizar si hay diferencias entre ambas y, en caso de que así fuese, aplicar su debido ajuste.

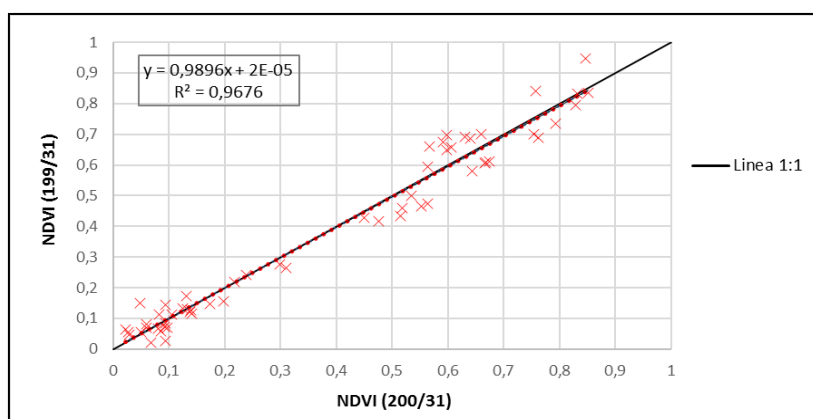
Para la realización de este calibrado se han buscado tres parejas de imágenes de ambas escenas, intentando que la diferencia entre fechas fuera la menor posible. Debido a que la diferencia mínima entre escenas es de siete días, se ha optado por la captación de puntos invariantes en ambas escenas, donde el índice NDVI debería ser muy estable, asegurando además que todo el píxel corresponde completamente a la superficie invariante que se busca recoger.

Se han recogido un total de doce puntos invariantes en zonas de asfalto, tierra y cubiertas forestales, con el objeto de tener información en todo el rango espectral. Los puntos elegidos han sido los mismos en las tres parejas de imágenes seleccionadas para la calibración.

Estas parejas elegidas han sido las siguientes:

- 17/10/2014 (escena 200/31) y 26/10/2014 (escena 199/31)
- 03/03/2015 (escena 199/31) y 10/03/2015 (escena 200/31)
- 01/08/2015 (escena 200/31) y 10/08/2015 (escena 199/31)
- 25/06/2016 (escena 199/31) y 02/07/2016 (escena 200/31)

A continuación, se extrae el valor del índice en los píxeles de las imágenes seleccionadas para la calibración y se han representado los valores de la muestra (los valores de las tres parejas) en un gráfico de dispersión donde se muestran, a modo de ejemplo, los resultados obtenidos para el NDVI (Figura 8).

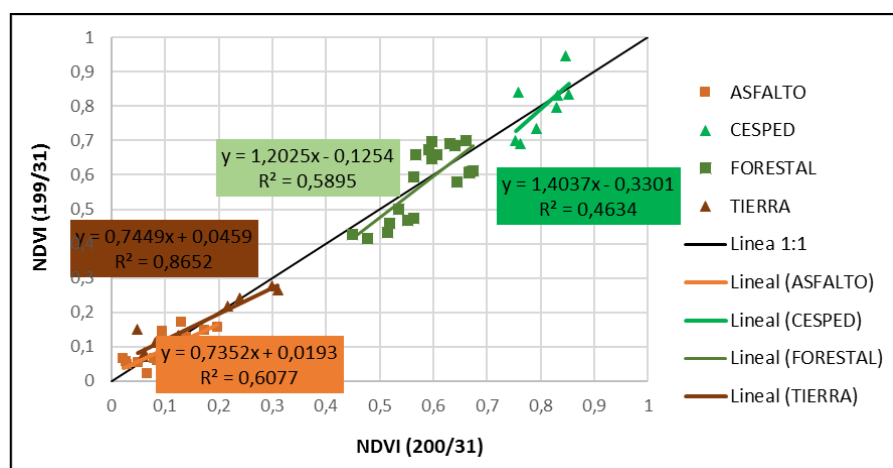


**Figura 8.** Interrelaciones entre NDVIs de pares seleccionados entre escenas 199/31 y 200/31 de Landsat 8



Se puede observar a simple vista y previamente a realizar análisis estadísticos de los datos que la línea de la ecuación es prácticamente coincidente con la línea 1:1 y la función de ajuste es casi perfecta.

En la calibración por cubiertas (Figura 9) se puede observar que algunas cubiertas ya no se ajustan tanto a la línea 1:1 (lo idóneo). Las cubiertas de vegetación (forestal y césped), la escena 200/31 da valores menores que la 199/31 en los NDVI bajos, mientras que para los NDVI altos ocurre lo contrario. En las cubiertas de suelo (asfalto y tierra) el comportamiento es justo el contrario: en los NDVI bajos la escena 200/31 da valores mayores que la 199/31 y en los altos es la 199/31 supera a la 200/31. De todos modos, como se ha visto el ajuste considerando todas las cubiertas en conjunto es bueno.



**Figura 9.** Interrelaciones entre NDVIs de las diferentes cubiertas de pares seleccionados entre escenas 199/31 y 200/31 de Landsat

Se ha realizado un análisis estadístico para comprobar si realmente hay una relación entre las dos variables estudiadas (escena 199/31 y escena 200/31): test estadístico de regresión y test T de Student para dos muestras relacionadas. En la Tabla 8 se muestran los resultados al aplicar el test estadístico de la regresión.

**Tabla 8.** Resultados del test estadístico de regresión para Landsat 199/31 frente Landsat 200/31

Estadísticas de la regresión								
Coeficiente de correlac		0,98366335						
Coeficiente de determi		0,96759359						
R^2 ajustado		0,96700438						
Error típico		0,05189779						
Observaciones		57						
	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	2,0476E-05	0,01151988	0,00177746	0,99858823	-0,02306587	0,02310683	-0,02306587	0,02310683
Variable X 1	0,98961058	0,02442035	40,5240048	1,1996E-42	0,9406711	1,03855007	0,9406711	1,03855007

Una forma de ver si hay relación estadísticamente significativa es con el valor de la probabilidad (p) de la variable X1, la pendiente, al nivel de confianza deseado. Por ejemplo, para un nivel de confianza del 95% el valor-p debe ser menor que el 5% (o 0,05) para afirmar que la relación es estadísticamente significativa, si es mayor que 0,05 no se puede rechazar la hipótesis de que no hay relación (al 95% de confianza).

En el análisis mostrado, para la variable X1 (Pendiente), 0 no está dentro del intervalo de confianza (95%), que va de 0,9406 a 1,0385, lo que indica que los datos no son consistentes con la hipótesis nula H0 Pendiente= 0 (no relación).

Además, el valor-  $p$  1,1996<sup>-42</sup> es menor de 0,05, por lo que se puede rechazar la hipótesis nula y decir que la relación es estadísticamente significativa, es decir, se rechaza la  $H_0$  “no relación” en favor de la hipótesis alternativa que es “sí hay relación”.

Además, se ha comprobado también si existen diferencias significativas entre las dos muestras de datos mediante un test estadístico denominado prueba T de Student para dos muestras relacionadas.

Se va a testar que la hipótesis nula de que la media de las diferencias entre la variable 1 (Landsat 200/31) y la variable 2 (Landsat 199/31) es igual a cero frente a la hipótesis alternativa de que la media de la variable 1 y la variable 2 no es igual a cero. Los resultados de este test se muestran en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Resultados de las estadísticas del test T de Student para dos muestras relacionadas, Landsat 199/31 frente Landsat 200/31

	<i>Variable 1</i>	<i>Variable 2</i>
Media	0,37854498	0,3746326
Varianza	0,08065026	0,08162843
Observaciones	57	57
Coeficiente de correlación	0,98366335	
Diferencia hipotética de medias	0	
Grados de libertad	56	
Estadístico t	0,57336276	
P(T<=t) una cola	0,28434728	
Valor crítico de t (una cola)	1,6725223	
P(T<=t) dos colas	0,56869457	
Valor crítico de t (dos colas)	2,00324072	

Que la media de la diferencia de Landsat (200/31) y Landsat escena (199/31) sea igual a cero significa que las variables estudiadas no son diferentes. Por tanto, si se acepta la hipótesis nula implica que estadísticamente no hay diferencias entre Landsat 199 y Landsat 200. Dado que el valor de  $P(T \leq t)$  dos colas para esta prueba es mayor o igual a 0,05, no podemos rechazar la hipótesis nula al nivel de confianza del 95,0%, por lo que se puede decir que no hay diferencias entre las variables a ese nivel de confianza.

Se ha realizado este mismo proceso de calibración y análisis de resultados estadísticos para el índice SAVI. La función de ajuste para el SAVI es de  $y = 0,9819x + 0,0175$  ( $R^2 = 0,9538$ ). En cuanto a los resultados estadísticos de los test de regresión el valor-  $p$  es 2,1179<sup>-38</sup> por tanto menor de 0,05, por lo que también se puede rechazar la hipótesis nula y decir que hay relación estadísticamente significativa entre ambas escenas. El valor  $P(T \leq t)$  dos colas obtenido en el estadístico T de Student para dos muestras relacionadas es menor a 0,05 (0,0098) por lo que se puede decir que en este caso hay diferencias significativas entre el SAVI de las escenas 199/31 y de la escena 200/31 a ese nivel de confianza.

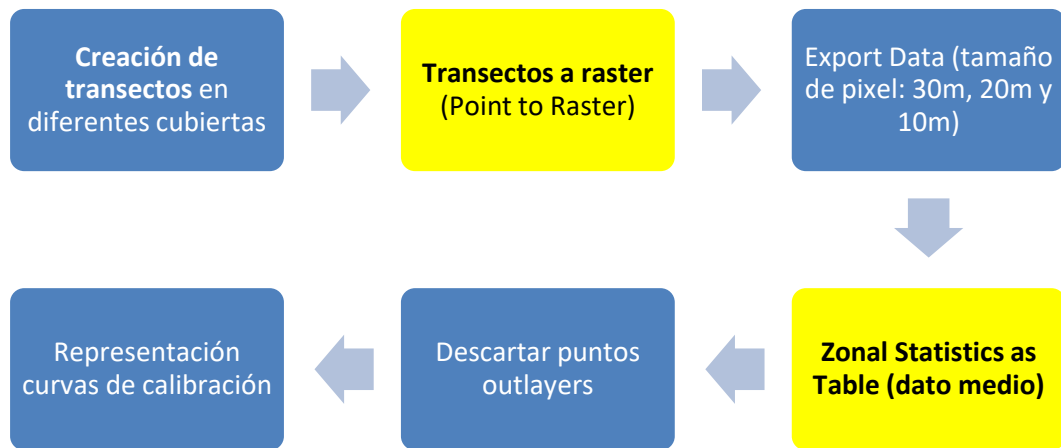
En cuanto al índice VARI, en coberturas forestales y césped se llegan a alcanzar en algunos puntos y fechas valores superiores a 1, tanto en las escenas 199/31 como en las 200/31. En la escena del 3 de marzo de 2015 (199/31) se dan valores superiores a 3 y 4 en coberturas forestales, no consiguiéndose un ajuste adecuado para la calibración del VARI. Más adelante se discute de nuevo este hecho. El índice VARI introduce la banda del azul en su formulación para tener una autocorrección del efecto atmosférico (Gitelson et al 2002; Jiménez-Muñoz et al 2009). Por ello, se repitió el cálculo del índice con las imágenes en reflectividad, pero sin aplicarles la corrección atmosférica (se denominarán VARI-TOA). En este caso la función de ajuste  $y = 0,9173x + 0,0072$  ( $R^2 = 0,9128$ ). Los test estadísticos muestran que sí hay relación significativa entre el VARI de la escena 200/31 y el de la escena 199/31 (valor  $-p$  2,8217<sup>-30</sup>), y que los índices no difieren significativamente ( $P(T \leq t)$  dos colas 0,42549).

A la vista de los resultados no se considera necesario aplicar calibración entre las escenas Landsat 199/31 y 200/31 para el NDVI y VARI-TOA, pero sí para SAVI.

## 5.2. Landsat 8 frente a Sentinel-2

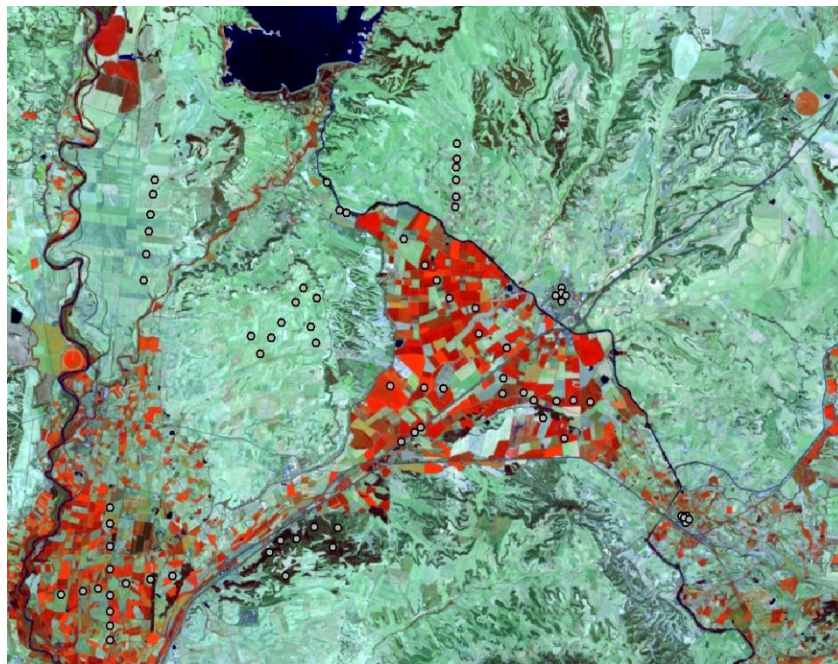
Uno de los propósitos de esta parte del trabajo es analizar cómo se comportará el reciente satélite Sentinel-2 y su grado de compatibilidad frente a uno de los satélites más usados y completos en cuanto a cobertura a nivel temporal y geográfica, el sensor OLI de Landsat 8.

La Figura 10 muestra la metodología empleada para llevar a cabo esta calibración entre las imágenes de los diferentes satélites:



**Figura 10.** Esquema de la metodología empleada para la calibración entre sensores de diferentes satélites

Para esta calibración se han seleccionado varias parejas de imágenes, siendo estas lo más próximas posibles en fechas para que no se hayan producido cambios en los índices o estos sean mínimos. Apoyándose en composición color de las imágenes, se han elegido transectos sobre diferentes coberturas: forestal, regadío, seco y urbano (Figura 11).

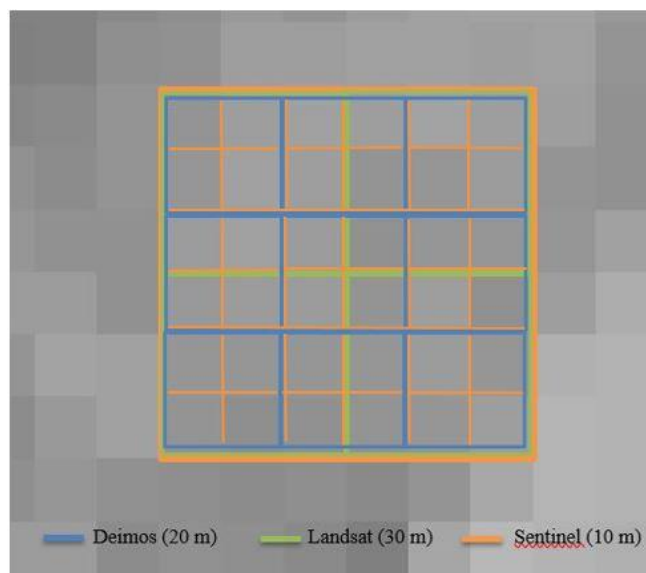


**Figura 11.** Transectos elegidos sobre diferentes coberturas para la calibración

En primer lugar, se crea una capa shapefile puntual con estos transectos para extraer los valores de los índices de vegetación de las diferentes parejas de imágenes en los diferentes puntos.

Una vez realizado este primer paso, se pasa esta capa de puntos a raster asignándole un tamaño de pixel de 60 metros x 60 metros. A continuación, exportamos este mismo raster a otros raster nuevos con los diferentes tamaños de resolución espacial que tenemos en las diferentes imágenes: 30m de Landsat, 20m de Deimos y 10m de Sentinel).

De esta forma en Landsat se extraerá el valor de 4 píxeles, en las imágenes Deimos el valor de 9 píxeles y en las imágenes Sentinel de 36 píxeles (Figura 12). Con esto, se asegura la extracción de un valor medio de una misma superficie en todas las imágenes de diferentes resoluciones espaciales.



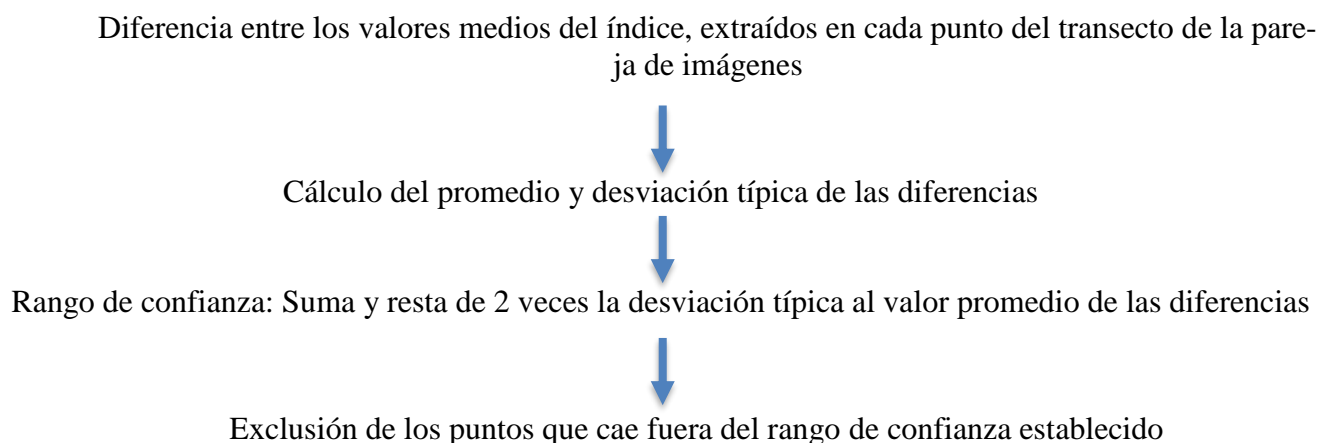
**Figura 12.** Representación de las agrupaciones de los píxeles para extraer los valores de las imágenes con diferentes resoluciones espaciales

A continuación, se extraen los valores de los índices de vegetación estudiados de las diferentes parejas. Esta herramienta nos ofrece el dato medio de estos valores que ha extraído de los píxeles (media de los 4 píxeles de Landsat, de los 9 de Deimos y de los 36 de Sentinel de cada punto o transecto).

Las parejas de imágenes seleccionadas para la calibración de Sentinel frente a Landsat han sido las siguientes:

- Landsat 25/06/2016 y Sentinel 23/06/2016
- Landsat 12/03/2016 y Sentinel 12/03/2016
- Landsat 26/08/2015 y Sentinel 28/08/2015
- Landsat 12/08/2016 y Sentinel 12/08/2016

Una vez extraídos estos valores de los índices de vegetación en cada pareja de imágenes se descartan los puntos “outlayers” o menos adecuados para la calibración ya que quizás no están correctamente cogidos o no corresponde el pixel en su totalidad a la cobertura que se desea elegir. Para ello se ha seguido siempre un mismo criterio que es el que se detalla a continuación.



Este resultado de la suma y resta del promedio y desviación típica de las diferencias son los rangos o valores críticos que se ha considerado entre los que tienen que estar los valores, excluyendo para la calibración los que están fuera.

En la Figura 13, se muestran las curvas de calibración de Sentinel-2 a Landsat 8 para los índices estudiados. Se ha decidido ajustar Sentinel-2 a Landsat 8 dado que en el presente estudio las imágenes Landsat 8 son mayoritarias. Además, se han realizado estas curvas de calibración únicamente con valores extraídos para la zona agrícola (regadío y secano) ya que el estudio de las series temporales es en su totalidad en cobertura de cultivos.

A simple vista se puede observar que la línea de ajuste obtenida en la calibración entre sensores con el índice NDVI está ligeramente por encima de la línea 1:1. Esto quiere decir que en un mismo píxel el valor de índice NDVI en Landsat estaría por encima del valor en Sentinel, siendo esto más acusado en los valores bajos de NDVI que en los altos.

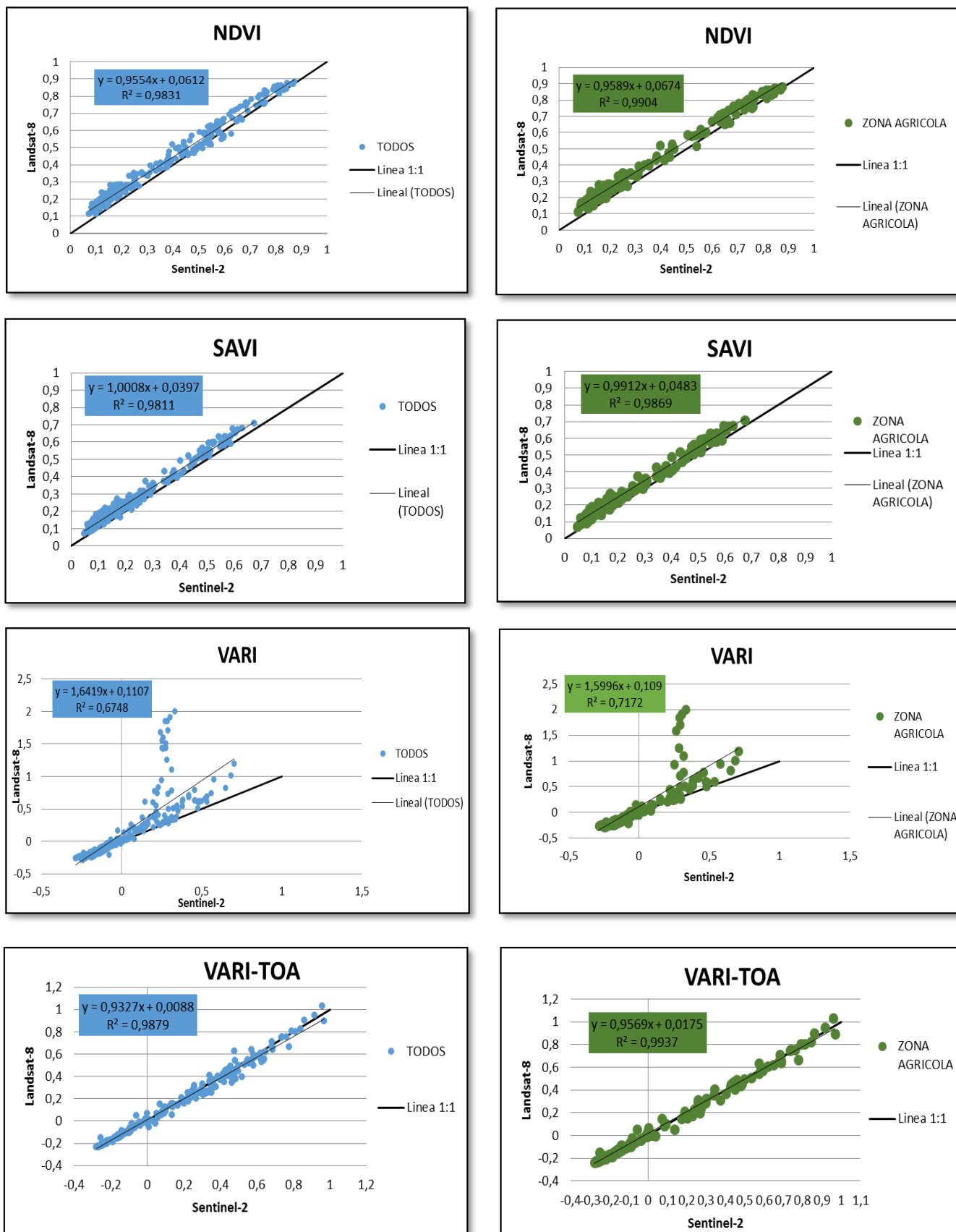
En el caso del índice SAVI esta línea va más paralela a la 1:1. No hay grandes diferencias entre las calibraciones realizadas con todos los puntos de las diferentes cubiertas y la de zonas agrícolas ya que las funciones resultantes son muy similares.

Al igual que en la calibración entre escenas de Landsat, inicialmente se realizó la calibración entre VARI de Landsat y Sentinel con el VARI calculado a partir de las imágenes corregidas según lo expuesto en el apartado 5.1. En este caso, los valores de Landsat están por encima de los de Sentinel en los valores altos de ambos índices, pero por debajo en los valores bajos. Además, vuelve a ser llamativos los altos valores en las coberturas forestales y regadío ya comentados en el caso de la calibración entre escenas de Landsat, tratándose de parejas de fechas diferentes a las utilizadas anteriormente. La eliminación de “outliers” del ajuste ha dejado fuera puntos que incluso alcanzan valores de VARI de 6, tanto en escenas Landsat de 200/31 como de 199/31. En el secano y zonas urbanas el valor de índice VARI nunca supera el valor 1 en los puntos utilizados para la calibración.

Sin embargo, al aplicar la calibración con VARI-TOA, los resultados muestran buen ajuste lineal en ambos casos, prácticamente coincidente con la línea 1:1 para la zona agrícola. El ajuste revela que, para valores altos del índice, Landsat da cifras superiores a Sentinel, sobre todo cuando dicho ajuste se realiza con los puntos de todas las cubiertas. Además, sólo en 1 punto se supera ligeramente el valor 1 en el índice (Figura 13).

Al comparar los ajustes entre Landsat y Sentinel con los obtenidos para las escenas Landsat se aprecia una mayor dispersión de los puntos a la recta de ajuste en el caso de la calibración entre las dos escenas Landsat.





**Figura 13.** Interrelaciones entre índices de vegetación de Landsat 8 y Sentinel-2

Se han realizado también los test estadísticos anteriormente utilizados en la calibración entre escenas de Landsat (regresión y T de Student para dos muestras relacionadas) para testar si existen relación entre Landsat y Sentinel y si estas diferencias que hemos observado a primera vista son significativas, y por tanto hay que aplicar la función de ajuste a los datos. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Resultados de los test estadísticos de regresión de Landsat 8 y Sentinel-2

		Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 99,0%	Superior 99,0%
NDVI (Todos)	Intercepción	0,061174824	0,00304606	20,0832716	6,26E-58	0,05518111	0,067168542	0,053279788	0,06906986
	Variable X 1	0,955447868	0,00712996	134,00462	4,05E-275	0,94141827	0,969477466	0,936967821	0,973927915
NDVI (ZONA AGRÍCOLA)	Intercepción	0,067366316	0,00292682	23,0168966	1,274E-57	0,06159421	0,073138419	0,059753232	0,074979401
	Variable X 1	0,958908377	0,00675047	142,050581	1,283E-199	0,94559549	0,97222126	0,94134942	0,976467334
SAVI (TODOS)	Intercepción	0,03972393	0,00211858	18,7502573	9,194E-53	0,0355551	0,04389276	0,034232588	0,045215273
	Variable X 1	1,000813315	0,0079484	125,913835	1,218E-265	0,98517288	1,01645375	0,980211137	1,021415494
SAVI (ZONA AGRÍCOLA)	Intercepción	-0,044892186	0,00279651	-16,0529065	1,881E-37	-0,05040766	-0,03937671	-0,052167064	-0,037617309
	Variable X 1	0,995652503	0,0082438	120,77585	1,646E-184	0,97939351	1,011911491	0,974206998	1,017098008
VARI-TOA (TODOS)	Intercepción	0,00884017	0,001914	4,617944	5,742E-06	0,005073	0,012607	0,0050731	0,01260724
	Variable X 1	0,93272116	0,005952	156,7184	2,62E-291	0,921009	0,944433	0,92100935	0,94443296
VARI-TOA (ZONA AGRÍCOLA)	Intercepción	0,01749249	0,001806	9,683474	2,432E-18	0,01393	0,021055	0,01392973	0,02105525
	Variable X 1	0,95690476	0,005456	175,3875	1,19E-215	0,946144	0,967665	0,94614417	0,96766534

Siguiendo los resultados estadísticos del test de regresión se ve que el valor de la probabilidad (p) de la variable X1, la pendiente, es menor que 0,05 (nivel de confianza del 95%) en todos los casos, por lo que se puede afirmar que para los índices NDVI, SAVI, VARI y VARI-TOA hay una relación estadísticamente significativa entre Landsat y Sentinel.

Los resultados del test T de Student para muestras relacionadas muestran que sí hay diferencias significativas al nivel de confianza del 95% entre Landsat y Sentinel para estos índices, ya que el valor de  $P(T \leq t)$  dos colas para esta prueba es menor a 0,05 en todos los índices de vegetación (Tabla 11). Por este motivo, debería aplicarse un ajuste entre los índices de los dos satélites cuando se realicen las series temporales con ellos.

Llama la atención que para VARI-TOA el test de medias emparejadas señale que hay diferencias significativas entre los dos sensores y, sin embargo, la aplicación de la función de calibración para la zona agrícola no suponga cambios en los valores del índice de Sentinel, al ser prácticamente la recta igual a la 1:1. La naturaleza de los datos (valores, escasa dispersión, error típico...) llevan a este hecho.

**Tabla 11.** Resultados de las estadísticas del test T de Student para dos muestras relacionadas de Landsat 8 y Sentinel-2

	NDVI(TODOS)		NDVI( ZONA AGRÍCOLA)		SAVI (TODOS)		SAVI (ZONA AGRÍCOLA)		VARI-TOA (TODOS)		VARI-TOA (ZONA AGRÍCOLA)	
	Variable 1	Variable 2	Variable 1	Variable 2	Variable 1	Variable 2	Variable 1	Variable 2	Variable 1	Variable 2	Variable 1	Variable 2
Media	0,40358	0,35837	0,40475708	0,3518488	0,261134	0,2212302	0,29151945	0,2453599	0,06669	0,0620194	0,027296378	0,01024541
Varianza	0,05039	0,05426	0,05989674	0,0645135	0,022639	0,0221738	0,03024514	0,0303815	0,08801	0,0999394	0,101431774	0,11007944
Observaciones	310	310	198	198	310	310	198	198	310	310	198	198
Coefficiente de correlación de Pe	0,99153		0,99517841		0,990487		0,99341576		0,99391		0,996861471	
Diferencia hipotética de las medi	0		0		0		0		0		0	
Grados de libertad	309		197		309		197		309		197	
Estadístico t	25,7256		28,4425254		33,82384		32,3386842		2,08641		8,235743289	
P(T<=t) una cola	4,21E-79		5,62E-72		7,34E-106		1,36E-80		0,01889		1,27005E-14	
Valor crítico de t (una cola)	1,6498		1,65262522		1,649832		1,65270531		1,6499		1,65270531	
P(T<=t) dos colas	8,43E-79		1,12E-71		1,47E-105		2,73E-80		0,03778		2,5401E-14	
Valor crítico de t (dos colas)	1,96767		1,97207903		1,967721		1,97220405		1,96782		1,972204051	

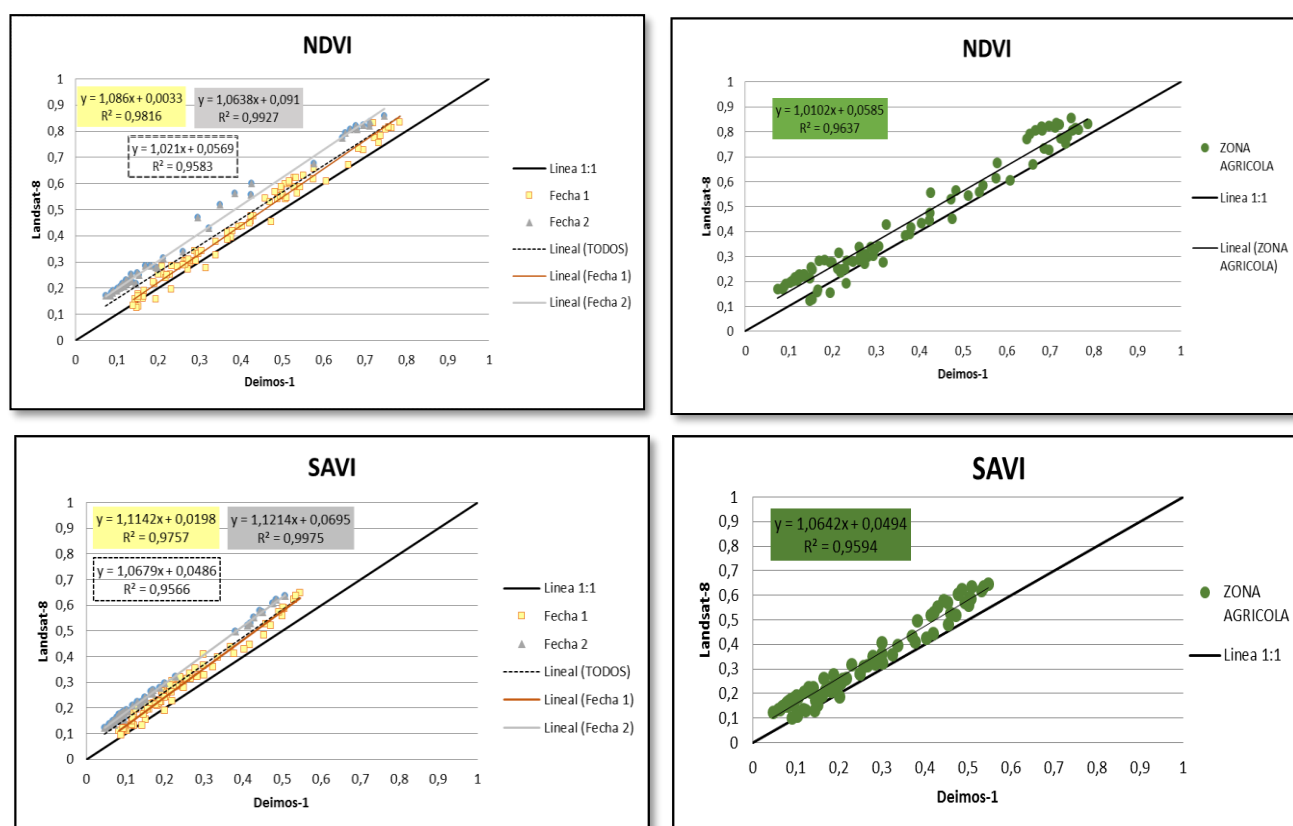
### 5.3. Landsat 8 frente a Deimos-1

La metodología empleada para llevar a cabo la calibración de Deimos frente a Landsat ha sido la misma que la indicada en el apartado anterior para Landsat frente a Sentinel.

En este caso, solo ha sido posible obtener dos pares de imágenes Landsat/Deimos donde hubiera una diferencia de pocos días entre la imagen de ambos satélites. Las parejas de imágenes seleccionadas para la calibración han sido las siguientes:

- Landsat 22/05/2015 y Deimos 23/05/2015
- Landsat 16/07/2015 y Deimos 16/07/2015

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 14. En este caso, no se dispone de datos de VARI ya que este índice no puede obtenerse con DEIMOS al no capturar información en la región del azul.



**Figura 14.** Interrelaciones entre índices de vegetación de Landsat 8 y Deimos

Al igual que ocurría con Landsat frente a Sentinel, los valores de los índices de vegetación de Landsat están generalmente por encima de los de Deimos. Esta diferencia, al contrario de lo que ocurría para Landsat frente a Sentinel, es más acusada en los valores altos que en los bajos para los dos índices. Como ocurría con Landsat y Sentinel, no hay grandes diferencias entre las calibraciones realizadas con los puntos de todas las cubiertas y los de las zonas agrícolas.

Realizando los mismos test estadísticos que en las anteriores calibraciones, los resultados muestran que mediante el test de regresión en los cuatro casos se puede afirmar que hay relación entre las variables.



En cuanto al estadístico T de Student para muestras relacionadas, muestra que sí hay diferencias significativas al nivel de confianza del 95% en ambos índices de vegetación, por lo que sería necesaria la calibración si se usan conjuntamente.

Como se observa en los gráficos de la parte izquierda, donde se ha representado por separado los puntos de las dos parejas de fechas disponibles con sus rectas de ajuste, una de ellas presenta valores muy por encima de la otra. Esto ocurre tanto en el índice NDVI como en el índice SAVI. Se necesitarían un mayor número de pares de imágenes adecuados para concluir con solidez unos resultados sobre esta calibración.

Debido a la falta de disponibilidad de más parejas de imágenes para la calibración y los resultados diferentes entre ambas, no se considera robusta y fiable la calibración obtenida entre Landsat y Deimos.

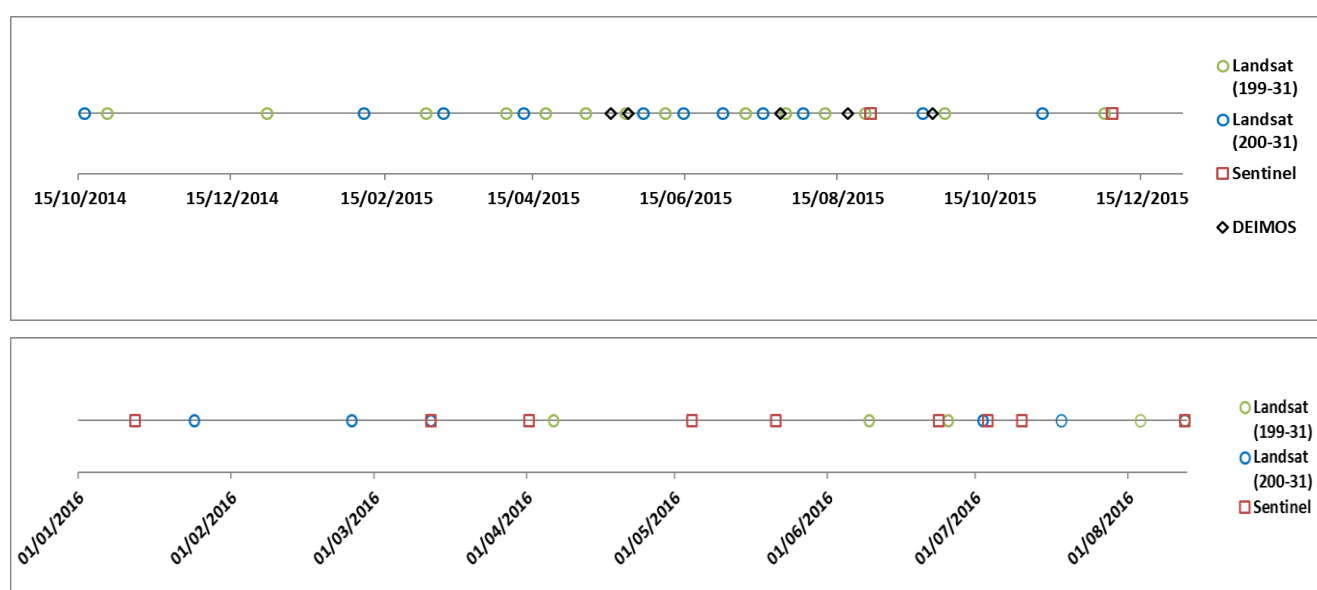
## 6. CARACTERIZACIÓN FENOLÓGICA DE LAS PARCELAS DE ESTUDIO A PARTIR DE SERIES TEMPORALES DE ÍNDICES DE VEGETACIÓN

### 6.1. Grado de complementación de los diferentes satélites al construir las series temporales

En función de las imágenes que se disponen de cada satélite para la realización del estudio, se ha analizado el grado de complementación de los diferentes satélites al construir las series temporales de datos.

Para el periodo comprendido entre octubre del 2014 y todo el año 2015 se disponen de un total de 25 imágenes Landsat, 5 imágenes Deimos y 2 Sentinel-2 distribuidas temporalmente de la manera que se muestra en la Figura 15.

A la vista de las imágenes disponibles y los resultados obtenidos en la calibración de los diferentes sensores se ha decidido construir en este periodo las series temporales únicamente con las imágenes de Landsat. Las imágenes Deimos no se han incluido puesto que la calibración con Landsat, debido a la escasa disponibilidad de parejas de imágenes para efectuarla, no se ha considerado robusta y fiable y, además, su distribución temporal no aporta nada relevante a la serie de Landsat. En cuanto a Sentinel, recientemente estrenado en 2015 y proporcionando imágenes a partir de agosto, pero de una forma aun no demasiado continua, solo aporta 2 imágenes que realmente no son necesarias para la serie temporal. Por tanto, para este periodo de tiempo se eligen las 25 imágenes del satélite Landsat para construir la serie temporal.



**Figura 15.** Distribución de las imágenes satelitales 2015 y 2016 disponibles para la realización de las series temporales

En el caso del año 2016, se disponen de un total de 10 imágenes Landsat y 9 Sentinel-2. En este caso sí que son necesarias las imágenes de ambos satélites para realizar las series temporales del año 2016 y se complementan adecuadamente. En los casos en que coinciden en fecha las imágenes de ambos satélites se ha elegido Landsat al ser el satélite que más imágenes aporta en el periodo de estudio y haberse tomado como referencia en las calibraciones. Además, siguiendo los resultados de las calibraciones realizadas en apartados anteriores los valores de Sentinel han sido ajustados a Landsat mediante la función de ajuste obtenida para la zona agrícola.

Hasta el momento es necesario trabajar con imágenes de ambos satélites para poder conseguir una serie temporal adecuada y completa, aunque es posible que en un futuro no muy lejano se pueda trabajar únicamente con Sentinel ya que proporciona una cobertura global de la superficie terrestre de la Tierra cada 10 días con un satélite y se reducirá a 5 días con el lanzamiento del Sentinel-2B.

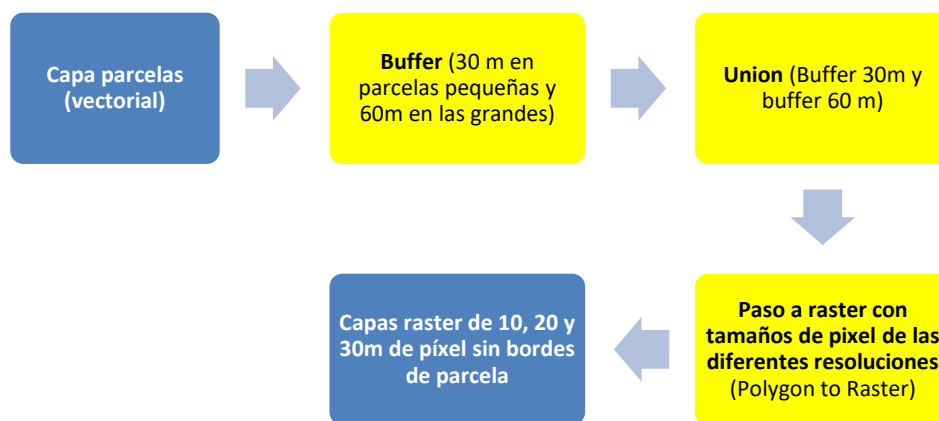
## 6.2. Obtención de series temporales de índices de vegetación

Los tres índices con los que se ha trabajado se van a utilizar para la realización de las series temporales en la caracterización fenológica en las parcelas de estudio. Para ello, se les aplica a las imágenes de los índices espectrales una máscara raster de las parcelas con el tamaño de píxel de cada tipo de imagen que no incluye los bordes de las mismas (Figura 16), ya que los píxeles de borde de las parcelas tienen una respuesta espectral que no es sólo la respuesta del cultivo (Portero, et al 1999).



**Figura 16.** Máscaras utilizadas para la obtención de series temporales de índices de vegetación en las parcelas de estudio

El procedimiento para la eliminación de píxeles de borde de la parcela es el que se muestra en la Figura 17. Se ha aplicado 60m (equivalente a 2 píxeles Landsat), para que la muestra fuese lo suficientemente amplia, pero asegurando que no se recogieran datos con respuesta espectral que no fuese del cultivo. En las dos parcelas de estudio más pequeñas la eliminación, para obtener una muestra suficiente, ha tenido que reducirse a sólo 30m (equivalente a 1 píxel Landsat).



**Figura 17.** Modelo esquemático de la metodología empleada para la eliminación de píxeles de borde en las parcelas de estudio

Con la máscara de las parcelas se extrae el valor del índice de vegetación para cada píxel de cada parcela. Esta herramienta, al proporcionar el valor y coordenadas de cada píxel permite, si es necesario, un seguimiento detallado en diferentes partes de la parcela. A partir de estos datos y utilizando la hoja de cálculo excel, se calcula el promedio, mediana, desviación típica, mínimo y máximo de cada parcela para todas las fechas de las imágenes utilizadas en el estudio. Este mismo procedimiento se repite con los tres índices estudiados, tanto para 2015 como para 2016. Se han generado gráficos con las series temporales obtenidas previa calibración de los datos.

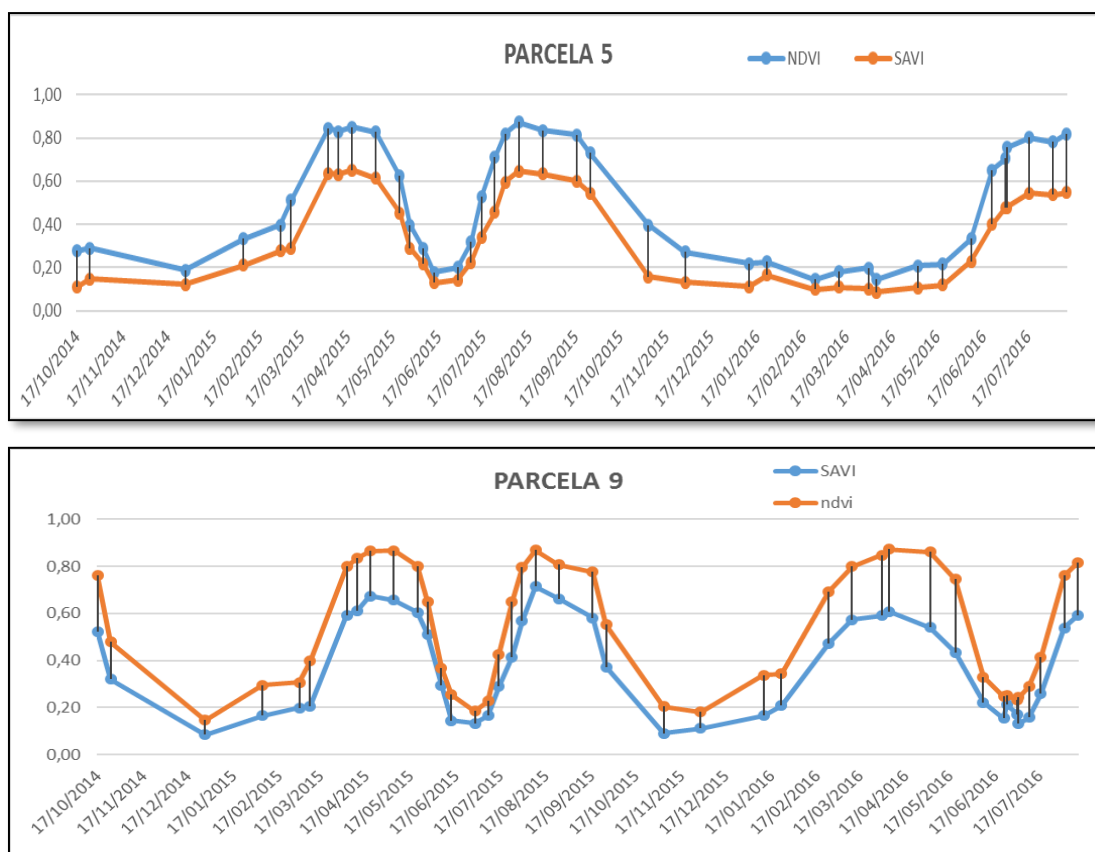
Con objeto de suavizar las curvas fenológicas obtenidas se ha aplicado el filtro Savitzky-Golay, que fue descrito en 1964 por Abraham Savitzky y Marcel Golay y se basa en el cálculo de una regresión polinomial local (de grado  $k$ ), con al menos  $k+1$  puntos equiespaciados, para determinar el nuevo valor de cada punto (Savitsky & Golay 1964). El resultado será una función similar a los datos de entrada, pero suavizada. La principal ventaja de esta aproximación es que preserva características de la distribución inicial tales como los máximos y mínimos relativos, así como el ancho de los picos, que normalmente desaparecen con otras técnicas de promediado (como la media móvil).

### 6.3. Comparación de las series temporales obtenidas con los diferentes índices

Una vez realizadas las series temporales de los índices de vegetación y representadas en gráficos lineales se comparan los tres índices de vegetación estudiados con el fin de detectar si unos son más útiles que otros, si algunos son más adecuados en determinadas fases de los ciclos del cultivo o si son o no adecuados para el presente estudio.

Se muestran a continuación una serie de ejemplos en diferentes parcelas para ver el comportamiento de los índices. En estos ejemplos se representan las series temporales antes de pasar el filtro de suavizado. Más adelante se discutirá la idoneidad o no de usar este filtro.

Como se observa en la Figura 18, los índices NDVI y SAVI (calculado con  $L=0,5$ ) siguen el mismo comportamiento a lo largo de los ciclos fenológicos del cultivo, aunque el segundo siempre con valores por debajo del NDVI. Esta diferencia entre estos dos índices es mayor cuando el cultivo está más desarrollado (NDVI y SAVI altos) y menor cuando está en el inicio de ciclo, donde domina el suelo frente a la vegetación, o al final de ciclo cuando el cultivo ya está senescente (NDVI y SAVI bajos).



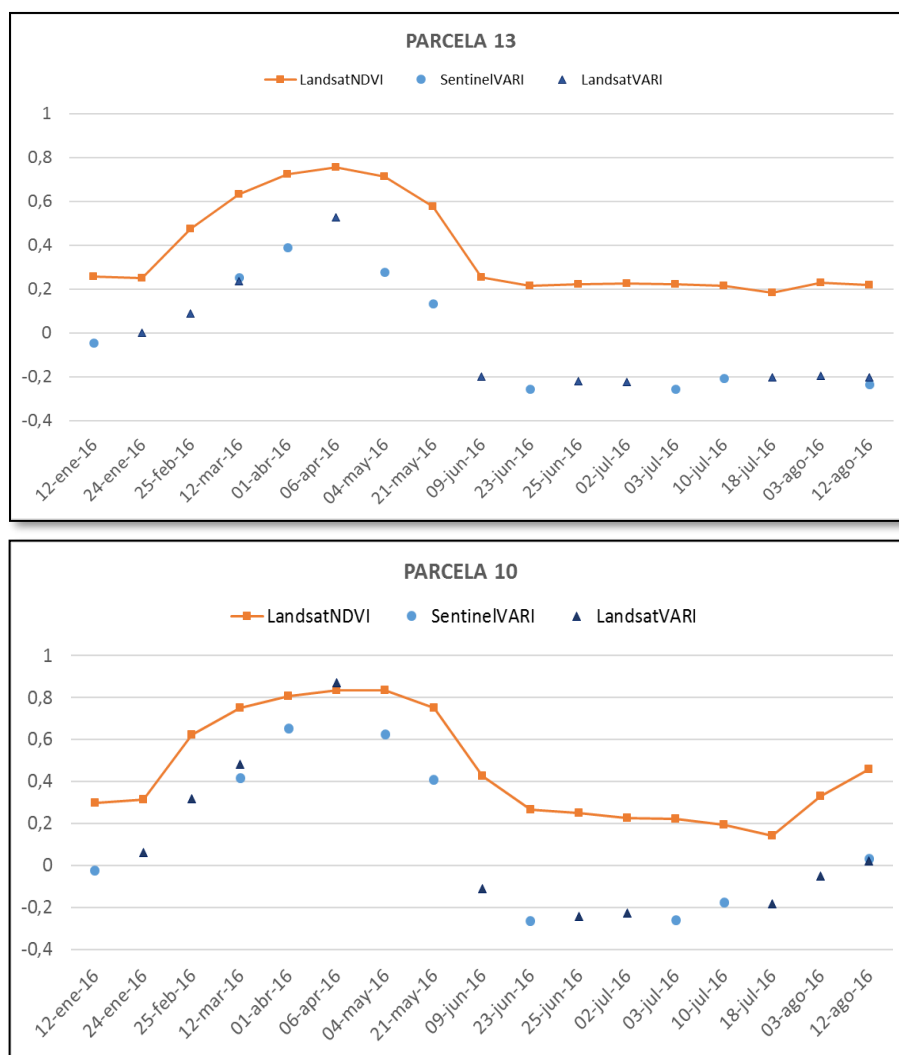
**Figura 18.** Comparación de las series temporales de índices de vegetación NDVI y SAVI

El SAVI está preparado para minimizar los efectos del fondo de suelo sobre la señal de vegetación al incorporar un factor L (ajuste del suelo constante en el denominador de la ecuación NDVI) y sería interesante su uso para fases del cultivo donde aún son visibles esos efectos del suelo.

Hay que tener en cuenta que el factor L elegido ha sido para una densidad de vegetación intermedia (0,5). Según el uso que se quiera dar a la información de las series temporales sería conveniente, si se eligiera este índice, ajustar este factor según la densidad de la vegetación. Por ejemplo, siguiendo las recomendaciones del autor de este índice (Huete, 1988), aplicar L de 1 para calcular el índice en las fechas en las que el cultivo está en pleno desarrollo vegetativo (densidades altas de vegetación), 0,5 en fases intermedias y 0,25 en el inicio de ciclo vegetativo y en el periodo de senescencia.

El cálculo del índice VARI en las parcelas de estudio (obtención con las imágenes de satélite corregidas radiométricamente según lo indicado en el apartado 5.1) confirma lo visto respecto a este índice en las calibraciones. Los valores que se obtienen son diferentes a los valores de índice VARI que se encuentran para cultivos similares en trabajos consultados en la bibliografía, donde dicho índice se obtiene a partir de datos de radiometría (Gitelson et al. 2002). Estas discrepancias son acusadas sobre todo cuando el cultivo se encuentra en la fase de alto desarrollo vegetativo, siendo mayores con las imágenes Landsat que con las de Sentinel. Este índice, así calculado, se descarta para el seguimiento fenológico.

Por el contrario, con VARI-TOA, sí que se consiguen unos valores más parecidos a lo visto en la bibliografía anteriormente mencionada. En la Figura 19 se muestra a modo de ejemplo para las parcelas de estudio 13 y 10 con cultivo en primavera la comparación de NDVI con VARI-TOA en 2016.



**Figura 19.** Comparación de las series temporales de índices de vegetación NDVI y VARI-TOA (2016)

Se observa que en general VARI-TOA y NDVI presentan un comportamiento similar en valores bajos de ambos índices, siendo los valores de VARI-TOA negativos y de magnitud similar a los vistos en los trabajos de Gitelson et al. (2002); Viña et al. (2004) y Jiménez-Muñoz et al. (2009). Sin embargo, cuando los valores son altos el comportamiento difiere. VARI-TOA tiende a alcanzar el valor máximo correspondiente con el mayor desarrollo vegetativo del cultivo de forma más abrupta mientras que el NDVI lo hace más suavemente. Este comportamiento del VARI-TOA es similar al visto por Viña et al (2004). En los estudios anteriormente mencionados, el valor de VARI en parcelas agrícolas siempre está por debajo del NDVI y nunca sobrepasan el valor 1. En este estudio, sí se observa alguna parcela que en alguna fecha supera este valor y/o sobrepasa el NDVI. Esto suele pasar más con Landsat que con Sentinel.

Para parcelas con un mismo cultivo que presentan NDVI bastante similares, puede apreciarse diferencias en el VARI-TOA tal y como se ve en la Figura 13. Deberá investigarse en el futuro cuales son las causas que producen estas diferencias. Entre ellas la calidad de las imágenes y la influencia del riego son algunas de las que se deberían analizar.

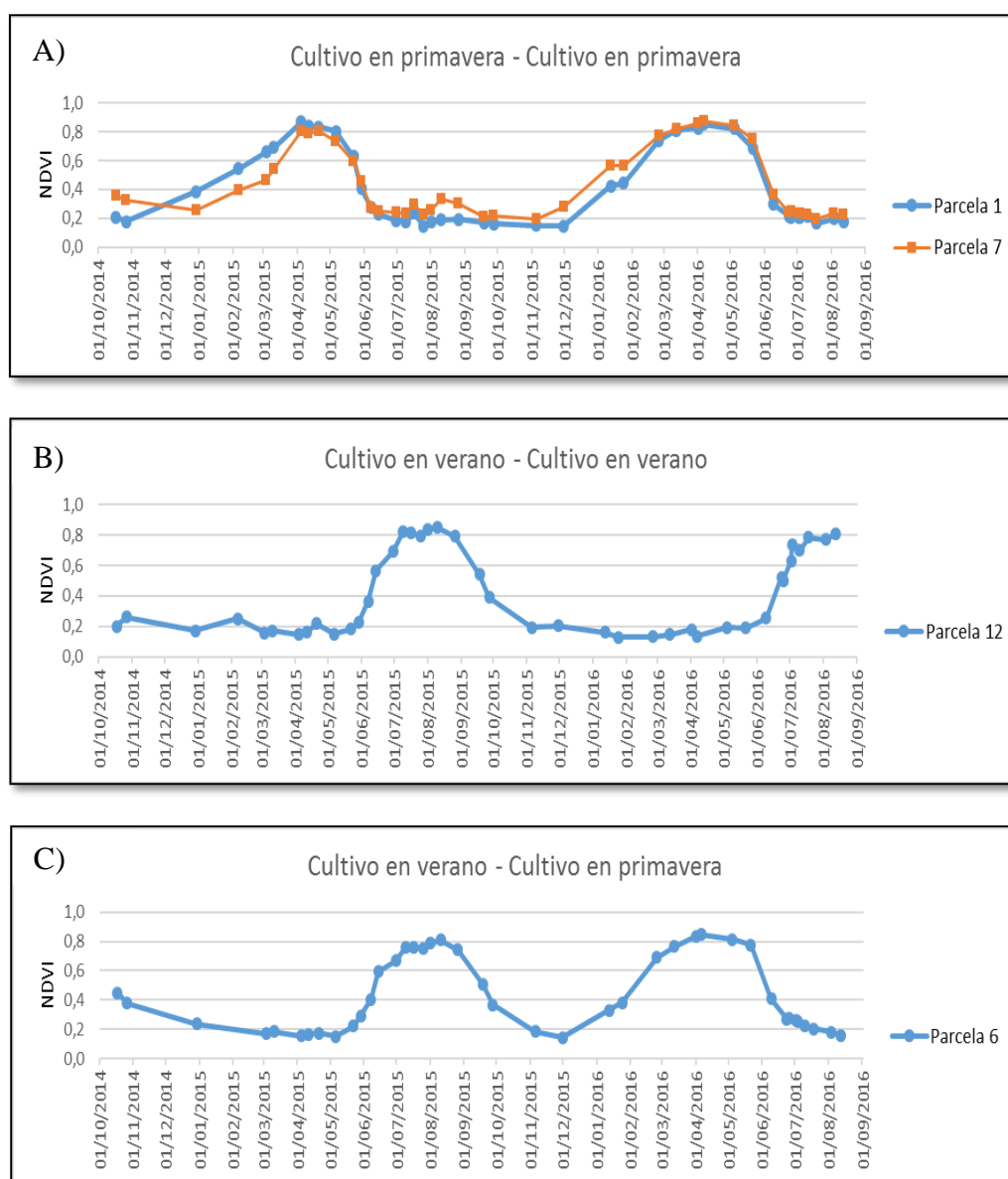
Con todo lo expuesto, se ha decidido utilizar el NDVI para el seguimiento de la fenología en las parcelas.

#### 6.4. Aplicación de las series temporales de índices de vegetación a la identificación y seguimiento fenológico de los cultivos

En este apartado se va a analizar el objetivo principal del trabajo que es estudiar la posibilidad y utilidad de series temporales de índices de vegetación derivados de imágenes de diferentes satélites para extraer información fenológica de diferentes cultivos en el regadío de La Violada y así poder compararlos con datos fenológicos reales recogidos previamente. Mediante esta comparación se podrá analizar hasta qué punto estas investigaciones mediante Teledetección pueden ayudar a diferenciar estas fases o puntos importantes en el ciclo de fenología de los diferentes cultivos.

##### 6.4.1 Identificación de cultivos

En primer lugar, y analizando los resultados de las series temporales de los cultivos de las parcelas de estudio, se puede identificar de una manera sencilla los tipos de cultivos presentes en ellas. A continuación, se muestran algunos ejemplos de las series temporales donde en un mismo gráfico se agrupan las parcelas que tienen los mismos tipos de cultivos estacionales en las diferentes campañas de estudio. En la Figura 20, se incluyen las parcelas que tienen un único cultivo en cada año.

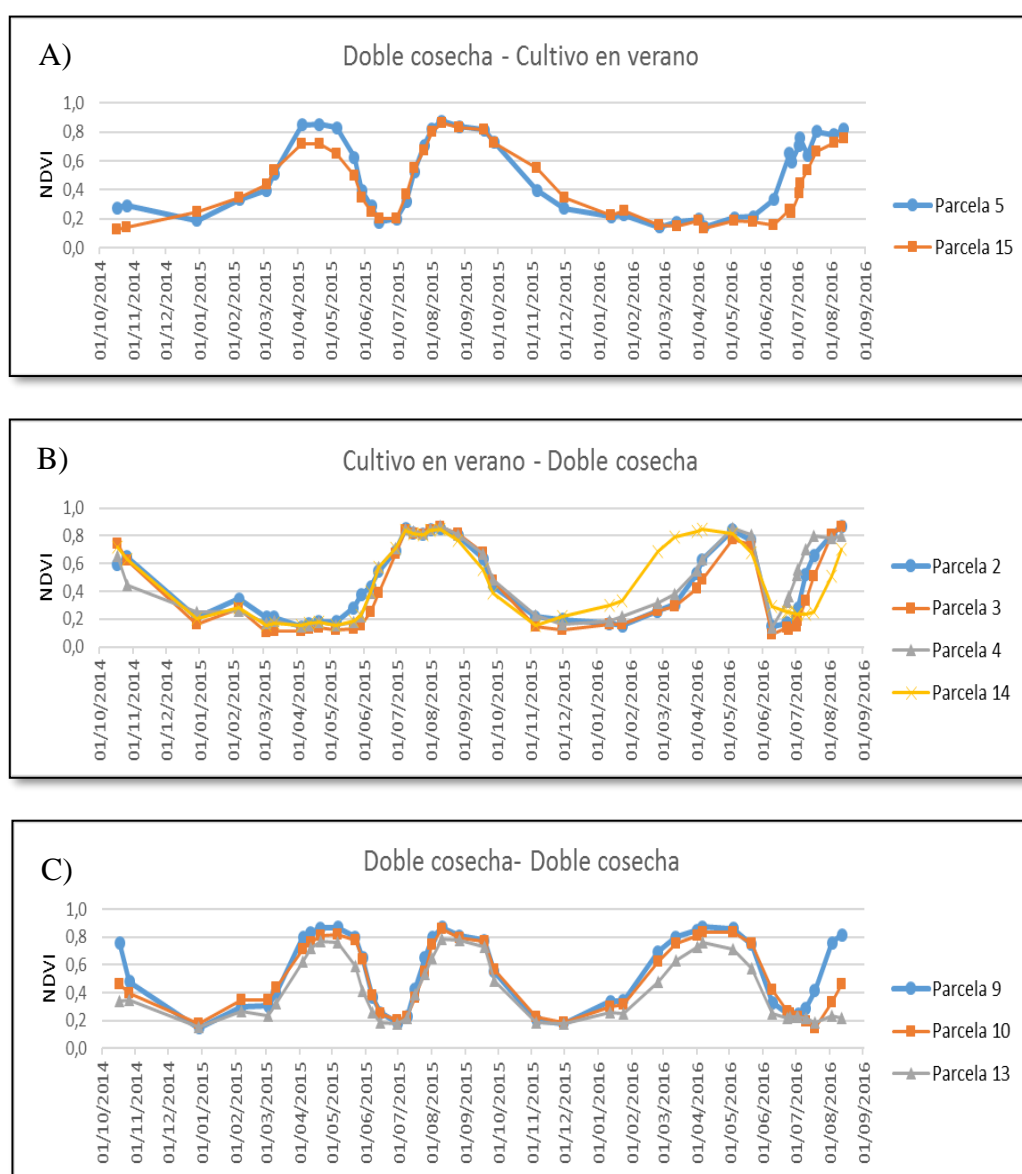


**Figura 20.** Series temporales NDVI de parcelas con un cultivo por campaña agrícola (2015 y 2016)



En la Figura 20 (A y C) se aprecia cómo hasta enero los valores de NDVI no aumentan (fase inicial del cultivo), a partir de enero el NDVI comienza a aumentar (fase de desarrollo del cultivo) hasta alcanzar valores máximos en abril-mayo (fase media del cultivo) que corresponde con la fase de máximo desarrollo vegetativo del cultivo que se produce en primavera. A partir de entonces el NDVI desciende (fase de maduración del cultivo) hasta alcanzar los valores más bajos en los meses de verano principio de otoño. Este comportamiento es típico de cereales de invierno, como son la cebada y el trigo. En la Figura 20 (B y C) el comportamiento es similar al observado en la Figura 20 (A) pero desplazado hacia los meses de verano, meses donde se dan los valores más elevados de NDVI. En este caso los valores más bajos de NDVI se producen en los meses de invierno, comenzando a aumentar el NDVI a partir de primavera. Es el comportamiento típico de los cultivos de verano como maíz y girasol.

En la Figura 21, se representan las parcelas que en algún momento del periodo de estudio han tenido más de un cultivo por campaña, conociéndose como dobles cosechas. Estas pueden alternar una doble cosecha en la primera campaña con un cultivo de verano en la segunda o en el orden contrario o ambas campañas con dobles cosechas. La parcela 13 se incluye en el grupo de la Figura 21 (C) aunque no es seguro que en 2016 vaya a ser doble cosecha.



**Figura 21.** Series temporales NDVI de parcelas con doble cosecha en alguna campaña (2015-2016)

Además de conocer si se trata de un cultivo presente en primavera, en verano, doble cosecha etc. las series temporales de NDVI muestran diferencias dentro de un mismo grupo de cultivos. Así por ejemplo en la Figura 21 (A) se aprecia como en verano de 2016 el cultivo va más retrasado en la parcela 15 que en la 5; en la Figura 21 (B), se identifica en las cuatro parcelas representadas un cultivo presente en la primavera de 2016, y sin embargo se ve claramente que el de la parcela 14 es diferente al de las otras tres; y en la Figura 21 (C), se ve como la parcela 13 alcanza valores menores de NDVI que la 9 y 10, indicativo de un menor desarrollo o peor estado del cultivo.

Por último, existen parcelas en las que se pueden encontrar otro tipo de cultivos no contemplados anteriormente, como es el caso de las parcelas 8 y 11 representadas en la Figura 22, donde se da un primer cultivo presente en primavera en 2015 y otros cultivos diferentes a los vistos hasta ahora en 2016. Los picos que se observan son típicos de un cultivo forrajero al que se le dan diferentes cortes a lo largo de la campaña.

En la Tabla 12 se resume la identificación realizada con las series temporales de NDVI. La identificación realizada permite tener información sobre el cultivo o tipo de cultivo que hay cuando no se tiene seguimiento fenológico en campo (Tabla x del apartado 4.1, incluida en la Tabla X en color azul). Se puede por tanto completar la información no disponible. Así, por ejemplo, se ve que en 2015 había cultivo de verano en la parcela 4, doble cosecha en la 5; y cultivo de primavera en la 11. En 2016, una forrajera en la 11, cultivo de primavera en la 7 y cultivo en verano en la 12.

**Tabla 12.** Comparación de la identificación realizada con serie temporal de NDVI con la información de campo disponible en las parcelas de estudio (2015 y 2016)

Identificado con series temprales de NDVI			Recopilado en campo y por encuesta	
Parcela	Cultivo 2015	Cultivo 2016	Cultivo 2015	Cultivo 2016
1	Cultivo de invierno	Cultivo de invierno	Cebada	Cebada
2	Cultivo de verano	Doble cosecha	Maíz	Guisante- Maíz
3	Cultivo de verano	Doble cosecha	Maíz	Guisante Maíz
4	Cultivo de verano	Doble cosecha		Girasol
5	Doble cosecha	Cultivo de verano		Maíz
6	Cultivo de verano	Cultivo de invierno	Maíz	Trigo
7	Cultivo de invierno	Cultivo de invierno	Cebada	Cebada
8	Cultivo de invierno	Doble cosecha	Trigo	Raigrás- Maíz
9	Doble cosecha	Doble cosecha	Cebada- Girasol	Cebada y maíz
10	Doble cosecha	Doble cosecha	Trigo- Girasol	Trigo
11	Cultivo de invierno	Forrajera		Alfalfa
12	Cultivo en verano	Cultivo de verano	Maíz	Maíz
13	Doble cosecha	Cultivo de invierno	Cebada y girasol	Cebada
14	Cultivo de verano	Doble cosecha	Maíz	Cebada y girasol
15	Doble cosecha	Cultivo de verano	Cebada y Maíz	Maíz
			En azul parcelas de seguimiento fenológico	

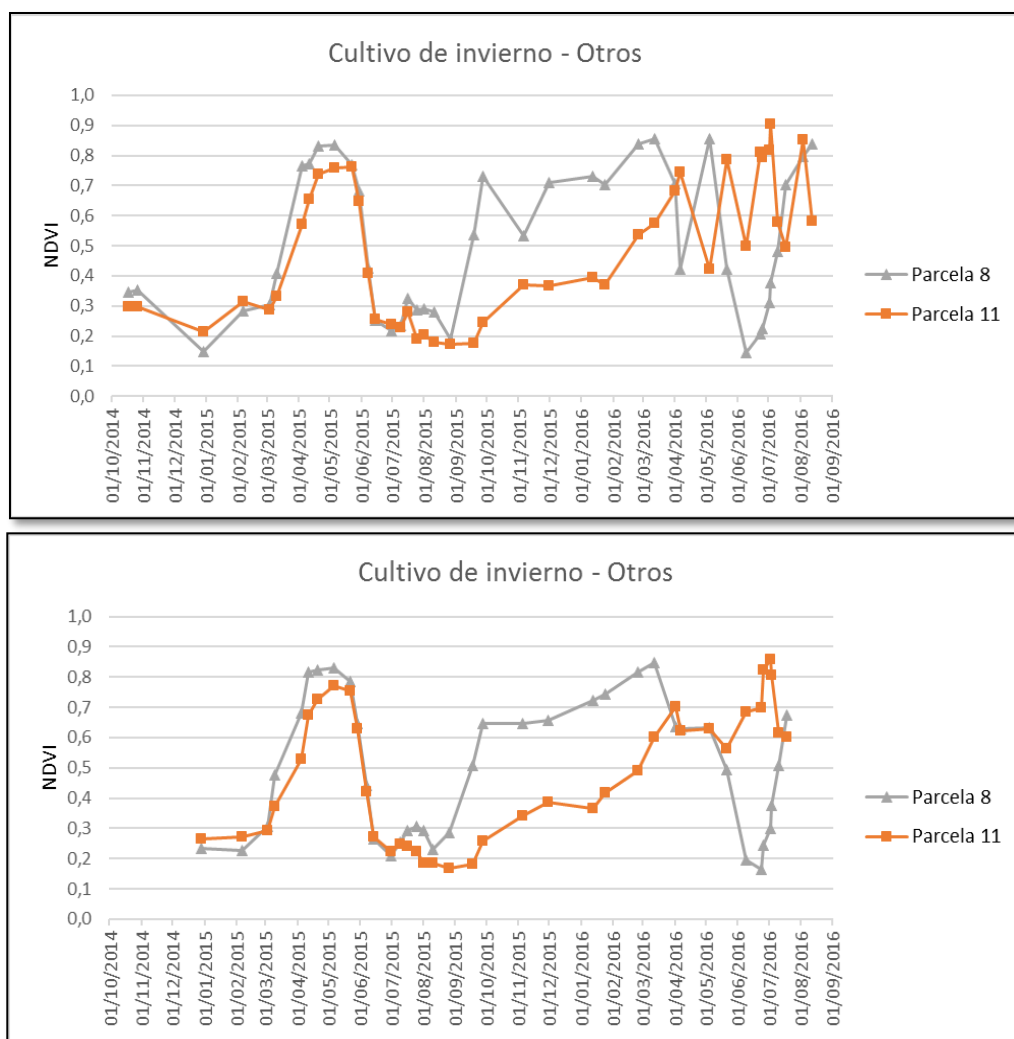
Además, a posteriori, se ha completado la información sobre el cultivo en las parcelas de estudio (encuesta a los agricultores o visita en campo) en las que no se había realizado seguimiento fenológico. La información sobre cultivos ayudará a interpretar y validar los resultados obtenidos. Comparando la identificación realizada con la información de campo disponible se constata que los cultivos presentes en primavera son cebada, trigo, guisante y en verano maíz y girasol. Además, se ve que la forrajera presente en la parcela 11 es alfalfa y que la doble cosecha de la parcela 8 es raigrás-maíz.



Como se comentó anteriormente, con objeto de suavizar las curvas fenológicas obtenidas se ha probado el filtro o función Savitzky-Golay. Este filtro está pensado para series de gran densidad de imágenes, casi diarias. De todos modos, se quiere estudiar cómo se comporta con este tipo de series de datos.

Los resultados obtenidos muestran algunas desventajas de su aplicación que pueden observarse en los ejemplos de la Figura 22. Para cultivos como por ejemplo forrajeras, alfalfa y raigrás, en los que pueden interesar ver los diferentes cortes, el filtro de suavizado suprime estas subidas y bajadas (picos) del índice que se producen con los cortes, mostrando una curva no representativa del crecimiento real de este cultivo. Con series temporales más densas sí podría ser útil. Además, con este filtro se pierde información al principio y al final de la serie datos, que también en algunos casos puede ser necesaria. En otros casos, sí que puede ser útil para suprimir algunos picos o diferencias de índice entre fechas que se pueden deber a problemas en las imágenes u otras causas externas a la propia fenología del cultivo que repercuten en la respuesta espectral, como por ejemplo malas hierbas, zonas encharcadas, etc.

Teniendo en cuenta todo esto, se ha decidido en este trabajo realizar la caracterización fenológica de las parcelas de estudio a partir de series temporales del NDVI sin aplicación del filtro. De todos modos, no se descarta su uso en el futuro cuando la serie Sentinel incremente su densidad de imágenes.



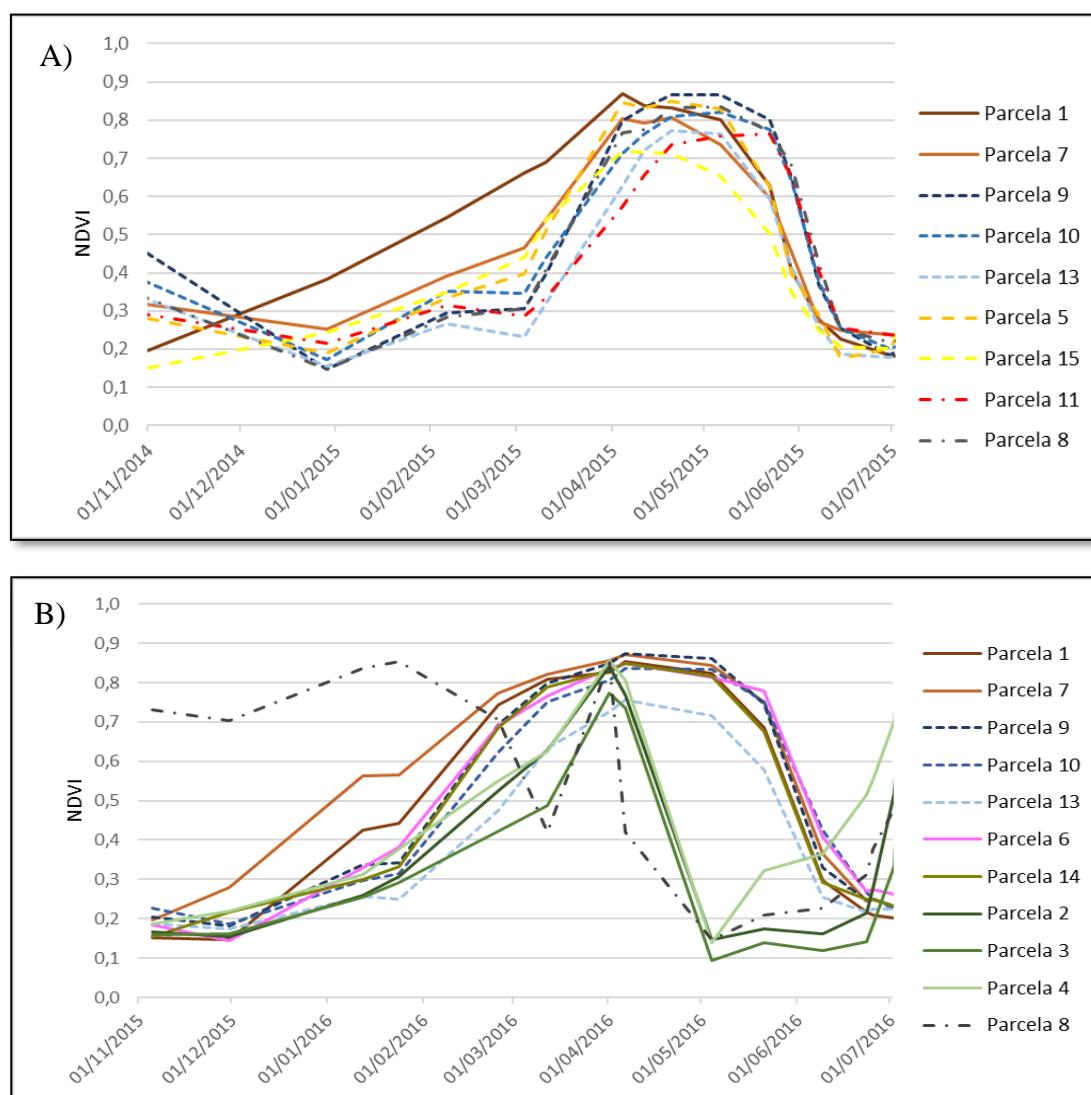
**Figura 22.** Series temporales NDVI de parcelas con cultivo de primavera y Raigrás/Alfalfa (sin filtro y con filtro de suavizado)

#### 6.4.2 Comparación fenológica entre parcelas y entre campañas agrícolas

Las series temporales de índices de vegetación permiten además poder comparar la evolución a lo largo de la campaña de un mismo cultivo en diferentes parcelas con objeto de ver las dinámicas que siguen, si unas alcanzan mayores valores que otras de IV y por tanto mayor vigor vegetativo, si tienen un crecimiento igual o diferente y también permiten comparar cómo ha ido el cultivo en una campaña agrícola respecto a otra.

En la Figura 23, se muestran las series temporales de NDVI en todas las parcelas que en la campaña 2015 y 2016 presentan altos NDVI en primavera, es decir, cultivos de invierno.

Si se compara la campaña del 2015 con la del 2016 se puede apreciar que en general para las parcelas con cereales de invierno, en 2015, el NDVI aumenta muy poco desde inicio de año hasta marzo, mientras que aumenta mucho en marzo y abril. Sin embargo, en 2016, ya en febrero se produce un incremento paulatino del NDVI hasta abril. Eso se traduce en una mayor amplitud de la curva durante la fase de desarrollo del cultivo en 2016 que en 2015. Factores biofísicos, climáticos, de manejo de cultivo etc. afectan al desarrollo del cultivo de diferentes formas y hacen que de un año a otro se produzcan diferencias en el ciclo vegetativo de un mismo cultivo.



**Figura 23.** Series temporales NDVI de parcelas con cultivos de invierno en la campaña 2015 y 2016

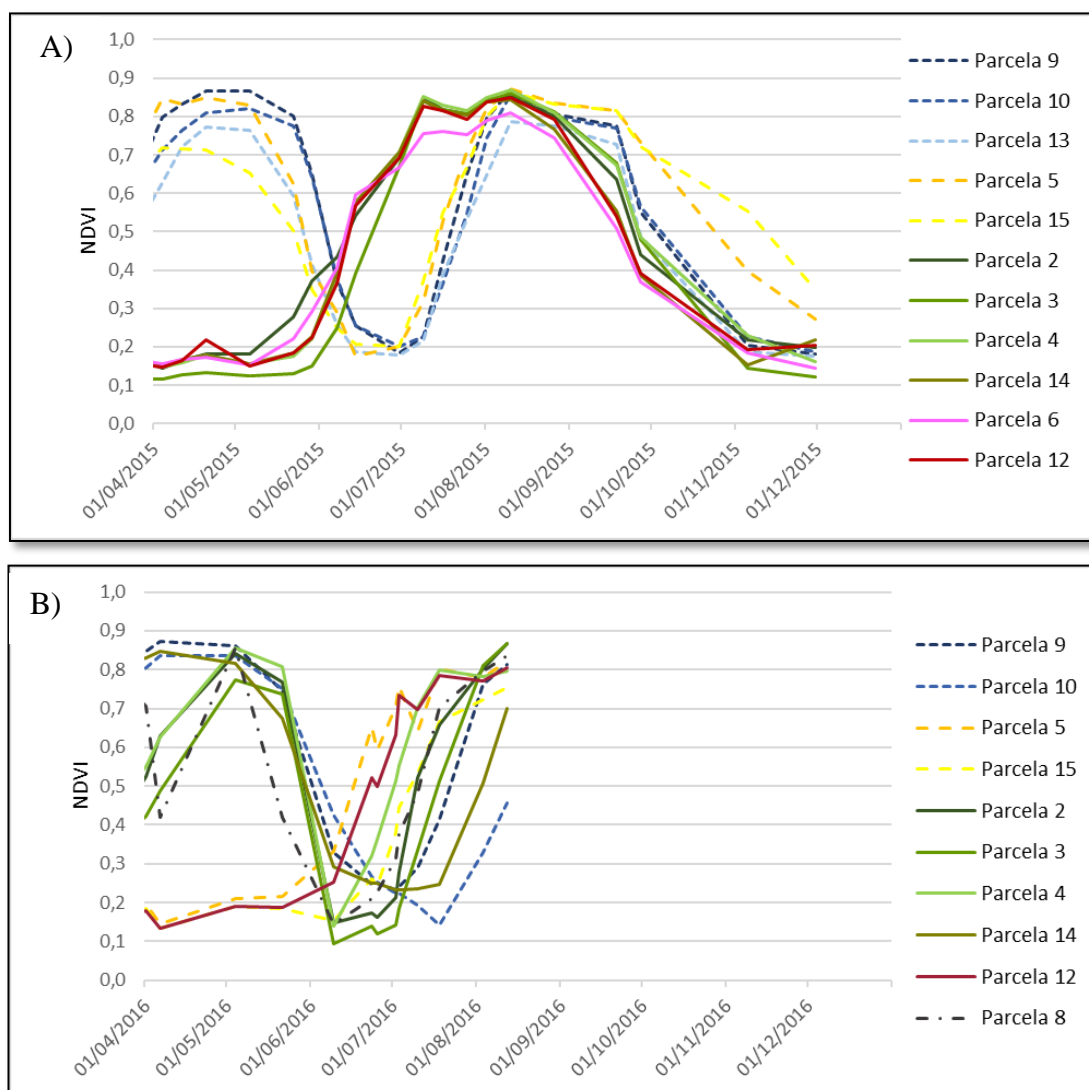
Como se puede observar, en la misma campaña, a pesar de tener el mismo cultivo, se encuentran diferencias en las curvas de NDVI. Esto indica que el desarrollo y evolución del cultivo no es similar. Los diferentes comportamientos están ligados al tipo de cultivo, a si han ido o no precedidos de otro cultivo, a la fecha de siembra, etc. En 2016, (Figura 23 B), se ven claramente tres tipos de parcelas. Por un lado, la parcela 8, con valores superiores a 0,5 desde noviembre y un pico descendente acusado en abril, siendo una parcela de raigrás (forrajera). Por otro lado, las parcelas 2, 3 y 4, que comienzan su desarrollo mucho más retrasadas que el resto, presentan una meseta de NDVI máximos (fase pleno desarrollo) menos amplia y comienzan antes la fase de maduración. Son parcelas con guisante. Por último, el resto de las parcelas presentan una curva similar a las de 2015 y corresponden a cereales de invierno, cebada o trigo.

En 2015 (Figura 23 A), las parcelas 1, 7, 5 y 15 corresponden a parcelas que se comportan de forma parecida, alcanzando antes que el resto el pleno desarrollo e iniciando antes el descenso del NDVI, es decir, la etapa de maduración. La parcela 13 presenta los dos años una curva por debajo de sus homólogas. Las parcelas 2 y 8 presentan para los dos años de estudio en los primeros meses valores de NDVI más elevados que el resto. Esto indica que van más adelantadas, pues comienza antes el crecimiento del cultivo, alcanzando un poco antes que las otras el pleno desarrollo (los NDVI más altos). Estas parcelas en 2016 y probablemente en 2015 no han venido precedidas de un cultivo en verano y se han sembrado antes.

En la Figura 24 se muestran todas las series temporales que en la campaña 2015 y 2016 tuvieron alto NDVI en primavera, es decir un cultivo de verano. En estos cultivos de verano también se encuentran diferencias entre las parcelas que tienen una doble cosecha y las que no, ya que las dobles cosechas suponen la siembra del cultivo de verano más tarde, una vez cosechado el de invierno. En el año 2015 (Figura 24 A), se ve claramente como el cultivo de verano de doble cosecha (parcelas 9, 10, 13, 5 y 15) viene más retrasado y les cuesta menos alcanzar el desarrollo máximo que las parcelas de cultivo único (parcelas 2, 3, 4, 14, 6 y 12). Las variedades de cultivo de segunda cosecha son de ciclo más corto. Además, se observa que, entre estas parcelas con doble cosecha, la 5 y 15, cuya segunda cosecha es maíz, alargan más el ciclo tras alcanzar el pleno desarrollo que las otras cuya doble cosecha es de girasol, cultivo de ciclo más corto.

En 2016, el estudio solo llega hasta agosto y no se dispone de curvas de evolución de NDVI completas para todo el ciclo del cultivo. Solo tres parcelas (5, 12 y 15) no son doble cosecha, es decir no vienen precedidas de cultivo de invierno. La parcela 15 va más retrasada que las otras dos.

En 2016 (Figura 24 B), las dobles cosechas son más variadas y combinan cereales de invierno o guisante como primer cultivo con maíz o girasol de segundo cultivo. La curva de evolución del NDVI muestra cómo se van desarrollando estas dobles cosechas. Así, por ejemplo, las parcelas 2 y 3 presentan unos NDVI mínimos en junio, periodo en el que ya se ha recogido el cultivo de primera cosecha y se ha sembrado el de segunda, para aumentar rápidamente el NDVI durante la primera quincena de julio. Estas parcelas tienen doble cosechas guisante-maíz. La parcela 4, también tiene guisante, pero seguido de girasol, presentando una curva algo diferente. Las dobles cosechas con cereal de invierno y cultivo de verano también presentan diferencias. Si se comparan las parcelas 9 y 10, ambas con cereal de invierno seguido de maíz, se ve que tienen una curva parecida en su forma pero que la parcela 10 va más retrasada que la 9. En la parcela 9 se cultivó cebada mientras que en la 10 se cultivó trigo, que como ya se ha indicado va retrasado unos 10-15 días respecto a la cebada, por lo que se cosecha más tarde y por tanto el cultivo de verano se siembra más tarde, de ahí el desfase observado.



**Figura 24.** Series temporales NDVI de parcelas con cultivo de verano, campaña 2015 y 2016

#### 6.4.3 Identificación de fases fenológicas

Por último, se va a intentar discriminar o diferenciar las etapas o fases claves en el ciclo fenológico de los diferentes cultivos a partir de la serie temporal de NDVI obtenida con los sensores/satélites seleccionados.

Una observación directa de las curvas de evolución del NDVI, como ya hemos visto, puede permitir determinar las diferentes fases del cultivo: fase inicial donde el NDVI es bajo y casi no aumenta; fase de desarrollo donde el NDVI se incrementa notablemente y alcanza su máximo valor; fase media o de pleno crecimiento en la que el NDVI presenta los máximos valores, y fase de maduración en la que el NDVI desciende hasta volver a alcanzar los valores mínimos.

Esta información permite conocer la duración de las fases del cultivo y está directamente relacionada con los coeficientes de cultivo, los cuales son muy útiles para determinar las necesidades de riego y para su programación (Allen et al., 1998). En las Figuras 23 y 24 vemos como pueden distinguirse estas fases, si bien establecer una fecha concreta de inicio y final de las mismas no siempre es fácil. En estos casos una serie más densa y completa de datos sería necesaria.

Para ver si se pueden identificar momentos concretos de la fenología, se calcula la pendiente de las series temporales de NDVI según la metodología expuesta en Wang et al, (2014), con objeto de visualizar donde se producen los mayores aumentos o disminuciones de valores del índice y ver si están relacionados o no con algún estado o momento clave del cultivo. Para ello se ha realizado la siguiente operación matemática:

$$\text{pendiente del NDVI}_{f_1} = (NDVI_{f_2} - NDVI_{f_1}) / (f_2 - f_1)$$

donde  $f_1$  y  $f_2$  son dos fechas consecutivas para las que se dispone de NDVI

Una vez se calcula este dato para todas las parcelas se representa el valor del NDVI junto el de la pendiente para así poder visualizar los picos que se producen, indicativos de un cambio brusco en el NDVI. En las Figuras 1, 2 y 3 del anejo 2 se incluyen estas gráficas para todas las parcelas de estudio.

A continuación se presentan algunos ejemplos concretos de cultivos en los que se ha realizado el seguimiento fenológico durante todo su ciclo de cultivo, representándose en las gráficas la evolución del NDVI (línea continua), la curva de pendiente (línea discontinua) y las distintas etapas o fases del ciclo fenológico recogidas en campo para cada parcela con el objeto de ver si guardan relación con la información de las pendientes obtenida, y ver si se repite un patrón que permita identificar estas fechas claves del ciclo fenológico. Hay que tener en cuenta que la información de campo no se recoge diariamente por lo que puede haber cierto desfase, si bien pequeño, con la realidad en las fechas indicadas en las Tablas 1, 2 y 3 del Anejo 1. Cuando la visita de campo no coincide con alguna fase, la fecha asignada se ha fijado en función del estado del cultivo en el momento de la visita con el conocimiento del observador sobre la fenología de cultivos en la zona.

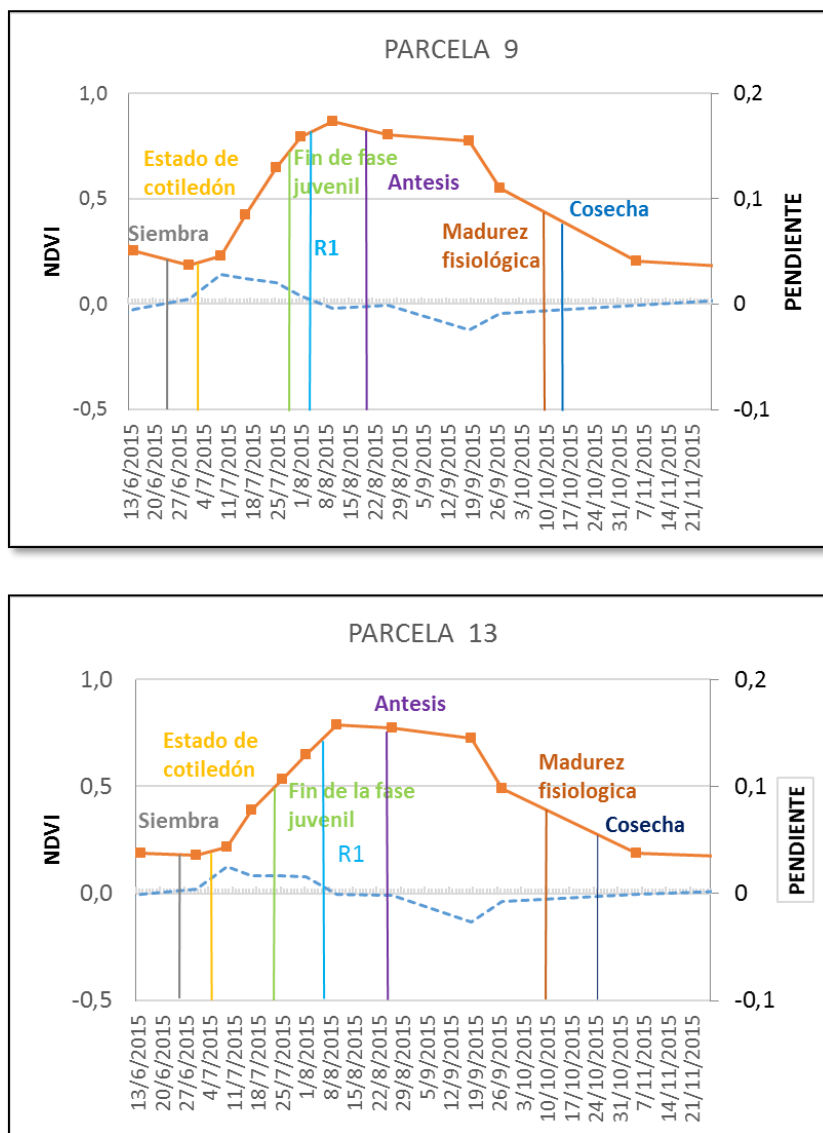
- **Girasol**

En todas las parcelas de estudio el girasol siempre es un segundo cultivo de las dobles cosechas. En todos los cultivos de verano que son dobles cosechas (Anejo 2) se aprecia bastante bien el momento que comienza la etapa de desarrollo del cultivo marcada por un pico ascendente importante al inicio de la fase de desarrollo del cultivo.

Se han escogido como ejemplo parcelas de 2015 pues en 2016 no se tiene el ciclo completo del cultivo. Las curvas de pendiente tienen una forma muy similar en las tres parcelas de 2015 (Anejo 2). Concretamente se han elegido dos parcelas (Figura 25), la 9 y 13, no mostrándose la 10 por ser idéntica a la 9 en evolución de NDVI, mientras que la 13 presenta ligeras diferencias.

El momento concreto de la siembra no puede identificarse exactamente, aunque si se ve claro el periodo de tiempo que se produce entre cultivo y cultivo, cuando el NDVI es bajo. Es en este periodo cuando se siembra, y como se aprecia es antes al pico ascendente en la pendiente que se ve al inicio de fase de desarrollo.

El estado de cotiledón se produce asociado al mencionado pico ascendente después de la siembra del cultivo, antes de alcanzar el máximo valor de pendiente en dicho pico. La etapa R1 se produce muy cerca de los valores máximos de NDVI que se dan en la fase media del cultivo y coincide con un descenso en la curva de pendiente. Antes de R1, en la fase de desarrollo, se produce el fin de la fase juvenil, siendo antes en la parcela 13 que en la 9. La antesis se produce justo cuando los valores de NDVI empiezan a descender y se produce un pico descendente en la pendiente. La madurez fisiológica en el cultivo, ya en la fase de maduración, coincide en un periodo importante sin imágenes de satélite que no permite una buena concreción del momento con la curva de pendiente.

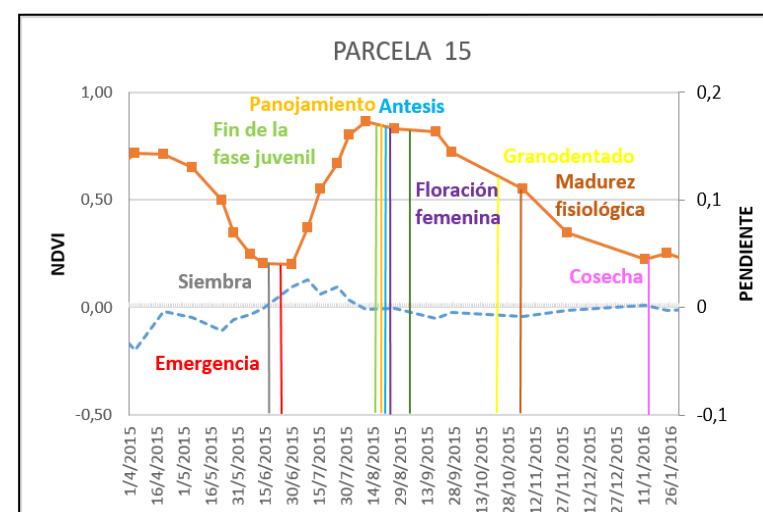
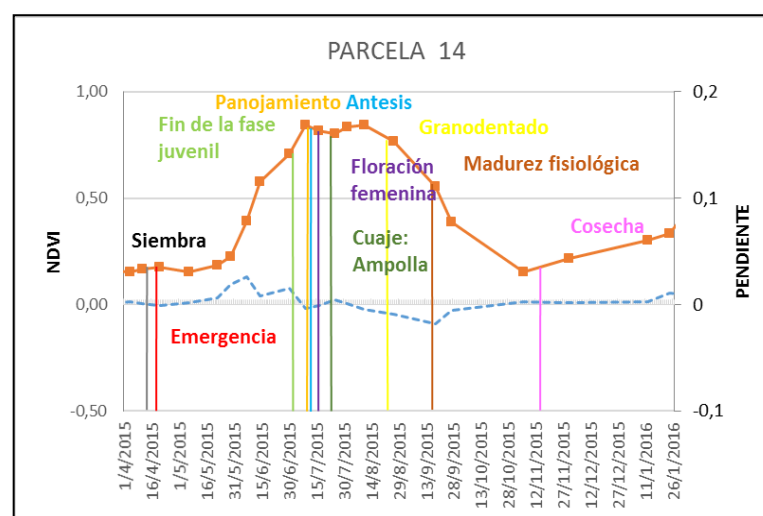
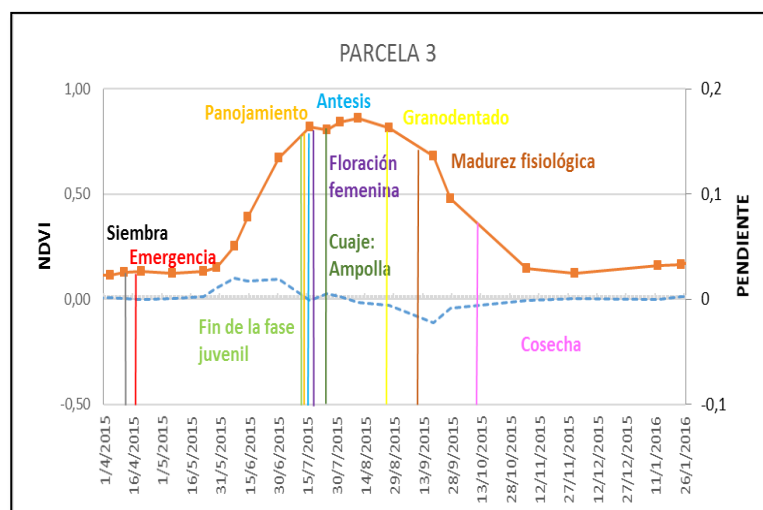


**Figura 25.** Series temporales de NDVI (línea continua) y su pendiente (línea punteada) en parcelas de doble cosecha con girasol

- **Maíz**

En el caso del maíz, encontramos parcelas en las que es segundo cultivo de la doble cosecha y otras en las que es cultivo único. En el Anejo 2, se aprecia como las curvas de pendiente para maíz tienen una forma muy similar, pero presentan ligeras diferencias, especialmente a principio del ciclo vegetativo según sean o no doble cosecha. Las de doble cosecha presentan un pico inicial en la curva de pendiente generalmente más ancho y acusado. Como ocurría en el girasol, en el maíz de doble cosecha, se aprecia bastante bien el momento que comienza la etapa de desarrollo del cultivo marcada por dicho pico en el inicio de la fase de desarrollo del cultivo.

Igual que ocurría en el girasol, solo se han escogido como ejemplo parcelas de 2015 (Figura 26) pues en 2016 no se tiene el ciclo completo del cultivo. Concretamente se muestran tres de las cinco parcelas en las que se ha realizado el seguimiento fenológico en 2015. Se ha elegido la 3 que presenta maíz como única cosecha en 2015, al que luego le ha seguido guisante en 2016, la 14 que también presenta maíz como única cosecha, pero seguido de un cereal de invierno, concretamente cebada en 2016, y la 15 pues es la única con maíz de segunda cosecha.



**Figura 26.** Series temporales de NDVI (línea continua) y su pendiente (línea punteada) en parcelas de maíz



En cuanto a las fases fenológicas del maíz, se aprecia claramente que las fases fenológicas de la parcela 15 con doble cosecha se producen después que en las del maíz como único cultivo. El momento concreto de la siembra difícilmente puede identificarse para las parcelas 3 y 14 en las que el maíz es cultivo único, mientras que en la 15 donde el maíz es de doble cosecha sí define un periodo de tiempo mucho más concreto al inicio del ciclo del cultivo donde NDVI es bajo. Es en este periodo cuando se siembra y emerge el cultivo. Es antes del pico ascendente en la pendiente que se ve al inicio de fase de desarrollo. Eso es lo mismo que se veía con el girasol, cultivo también de segunda cosecha.

En el maíz del fin de la fase juvenil al cuaje pasa un periodo corto de días, normalmente unos 15 días o menos en los que se dan además el panojamiento, antesis y floración femenina normalmente concentrados en unos 5 días. La disponibilidad de imágenes debería ser muy alta en esas fechas para poder identificar estos momentos. Pese a ello, se observa que en las parcelas de maíz como único cultivo todas estas fases coinciden con un pico descendente acusado en la curva de pendientes. En la única parcela de maíz de segunda cosecha, no se aprecia esto claramente. Habrá que comprobarse en el futuro con más parcelas si este comportamiento se da o no.

Finalmente indicar que la madurez fisiológica también coincide con un pico descendente en la curva de pendientes en la fase de maduración del cultivo para las parcelas 3 y 14. Sin embargo, para la parcela 15 con doble cosecha, sigue un comportamiento similar al mencionado en el girasol. Igual que anteriormente habrá que comprobarse en el futuro con más parcelas si este comportamiento se da o no.

- **Cereales de invierno: cebada y trigo**

Como podemos observar, las curvas de pendiente de estos cultivos son muy similares en todas las gráficas, tanto en el año 2015 como en el 2016, presentando picos característicos y similares (Anejo 2).

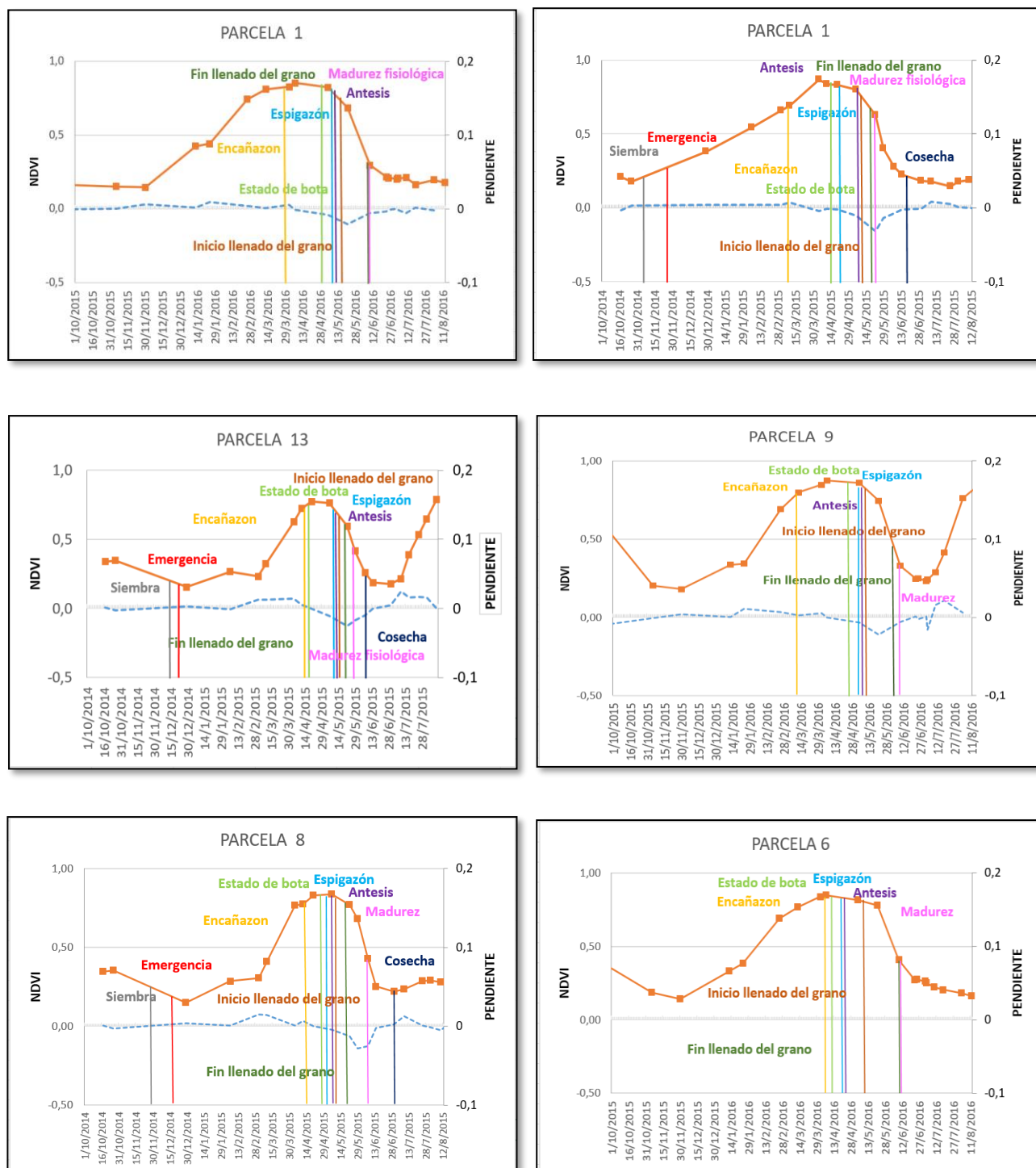
Para estos cultivos se han elegido 6 ejemplos (Figura 27), buscando que estén representados tanto la cebada como el trigo en ambos años, y formando parte o no de dobles cosechas: la parcela 1 que contiene cebada como único cultivo en ambos años; las parcelas 13 y 9 que son cebada en doble cosecha en 2015 y 2016 respectivamente; y las parcelas 6 y 8 con trigo como único cultivo en 2015 y 2016 respectivamente. Para las parcelas de 2016 se carece de la información sobre fecha de siembra y emergencia pues el CITA no realiza las encuestas a los agricultores hasta el final de la campaña agrícola.

Analizando las diferentes fases y estados fenológicos, se ve que el encañazón se produce cuando el cultivo aún está creciendo, y según las parcelas unas veces más próximo al estado de bota y otras más alejado de este estado. Parece querer coincidir con una pequeñísima variación en la curva de pendiente.

Hay unos cambios del cultivo, de estado de bota a inicio de llenado de grano, que se producen en un periodo corto de pocos días, normalmente unos 15 días, igual que ocurría en el maíz. Estos estados coinciden con los NDVI más altos y se dan antes de pico descendente de la curva de pendientes que se aprecia durante la fase de maduración. Establecer concretamente cuando se producen estos estados es muy difícil con las imágenes disponibles. Se necesitaría mayor número de imágenes y más continuas, incluso diarias en algunos momentos como el de la antesis. Pese a ello, se observa que el estado de bota siempre se produce cuando se alcanza el máximo NDVI y en los primeros momentos en que comienza a descender ligeramente la curva de pendiente.

En cuanto a la fase de madurez fisiológica, se produce siempre lógicamente en la fase de maduración y coincide con el final del aumento del pico de la curva de pendiente donde la pendiente es casi nula (valor 0) que se da al final de la fase de maduración, cuando los valores de NDVI vuelven a ser los más bajos.

El momento de cosecha es muy variable y depende de cada agricultor. Solo en los casos de doble cosecha, se puede determinar el periodo en el que se produce pues justo antes de la siembra del 2º cultivo de la doble cosecha (Ver los comentarios de siembra para girasol y maíz de segunda cosecha).



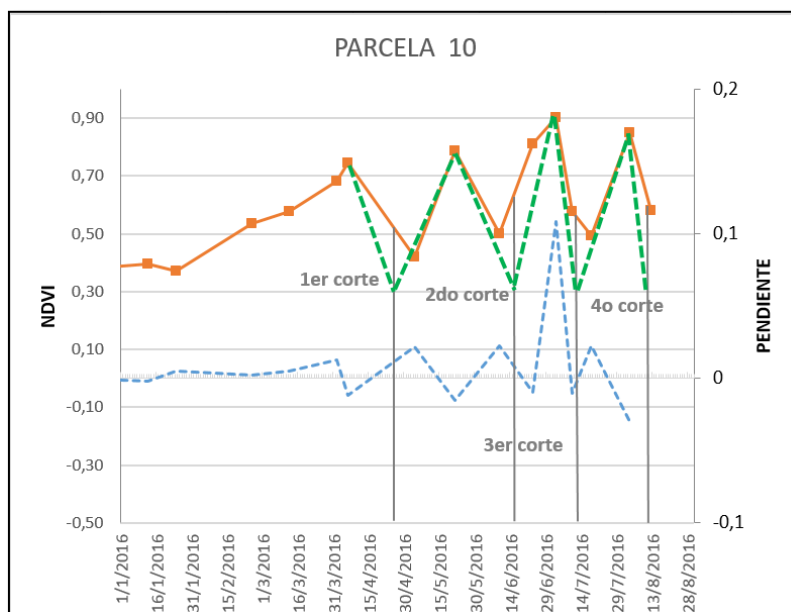
**Figura 27.** Series temporales de NDVI y su pendiente en parcelas con cebada y trigo (2015 y 2016)

- **Alfalfa**

Se ha considerado conveniente incluir también la única parcela con alfalfa con objeto de mostrar hasta qué punto pueden detectarse los cortes y la evolución en el crecimiento del cultivo tras los mismos. En la Figura 28, se representa además de la curva de evolución del NDVI obtenida a partir de las imágenes disponibles y la de pendientes, una curva de evolución de NDVI (línea discontinua verde) que teóricamente saldría considerando las fechas de corte y estableciendo el NDVI mínimo de la parcela tras el corte en 0,3 (valor fijado pro experiencias previas), y considerando como valor de NDVI en el momento del corte el que nos da como máximo la gráfica de evolución de NDVI

Como se aprecia en la figura, tanto la curva de evolución de NDVI como la curva de evolución de la pendiente marcan unos picos acusados. Estos picos, descendentes en el primer caso y ascendentes en el segundo, se producen en las fechas próximas a las de los cortes, si bien no son coincidentes con dichas fechas. Esto se debe a que no se disponen de imágenes suficientes para captar el momento de menor y mayor desarrollo y por tanto la curva de evolución de NDVI, delineada a partir de las imágenes disponibles, se aleja en esos momentos de la realidad. Para conocer el momento del corte es necesario contar con una densidad mayor de imágenes. Un número suficiente de imágenes mostraría un descenso brusco del NDVI y por tanto un aumento bruco de la pendiente en el momento del corte.

Para mostrar esto, se compara el primer corte y el tercer corte. Se ve que el tercer corte presenta un descenso del NDVI más brusco (mayor pendiente) que la del primer corte. Esto indica que el NDVI máximo que se detecta con la curva de NDVI en el tercer corte está más próximo al NDVI máximo que se tiene justo en el momento del corte. Sin embargo, en el primer corte la fecha de máximo NDVI que se tiene con la serie temporal disponible es anterior a la fecha real de corte. Faltaría alguna imagen posterior para detectar este momento.



**Figura 28.** Serie temporal de NDVI y su pendiente para la parcela de alfalfa en 2016

## 7. CONCLUSIONES

La identificación y seguimiento fenológico de las parcelas de cultivo en el polígono de la Violada (Huesca) a partir de series de índices de vegetación requiere una serie adecuada y completa de datos que sólo puede conseguirse combinando diferentes satélites.

Los tres satélites elegidos, Landsat-8, Sentinel-2 y Deimos-1 se complementan bien, pero en el periodo de estudio, octubre 2014 a mitad agosto 2016, los problemas de nubosidad, la imposibilidad de acceder a imágenes Deimos de 2016 durante el desarrollo del trabajo, el escaso número de imágenes Sentinel en 2015, y la coincidencia en fecha de algunas imágenes de diferentes satélites, no permite tener siempre un mínimo de dos imágenes por mes, principalmente en los meses de final de otoño e invierno. Pese a ello, se ha conseguido una serie temporal de imágenes que ha permitido la identificación de tipo de cultivos y su seguimiento en las parcelas de estudio.

En el presente trabajo, para el periodo octubre 2014-2015 con 25 imágenes Landsat disponibles, las imágenes Deimos y Sentinel no aportan nada relevante a la serie Landsat. En cambio, de enero a agosto de 2016, con solo 12 imágenes Landsat, las 9 imágenes de Sentinel sí complementan adecuadamente a las Landsat y ayudan a obtener una serie de datos más densa con un total de 17 fechas.

La comparación de los índices de vegetación obtenidos de los diferentes satélites en el área de estudio muestra que los valores de NDVI y SAVI de Landsat-8 generalmente están por encima de los de Sentinel-2 y Deimos-1, no así los de VARI-TOA que prácticamente se sitúan sobre la recta 1:1.

El test estadístico T de Student para dos muestras relacionadas indica que hay diferencias significativas para un nivel confianza 95% entre el SAVI de las escenas Landsat 199/31 y 200/31 y para los NDVI, los SAVI y los VARI-TOA (VARI en el techo de la atmósfera) entre Landsat y los otros dos satélites.

Por tanto, se aconseja la inter-calibración de los índices en estos casos antes de generar la serie temporal de datos. Las pocas parejas de imágenes disponibles para realizar la calibración llevan a no considerar robusta y fiable la función de ajuste obtenida entre Landsat y Deimos. Sería aconsejable en el futuro repetir todas las calibraciones incluyendo un mayor número de parejas de imágenes.

Las series temporales de NDVI, SAVI (con  $L=0,5$ ) y VARI-TOA permiten seguir el desarrollo del cultivo en las parcelas de estudio y diferenciar las cuatro fases principales: inicial, desarrollo, media y maduración. Las curvas de evolución del cultivo descritas mediante NDVI y SAVI son muy similares. Estas curvas discurren más o menos paralelas, aunque SAVI siempre presenta valores más bajos que NDVI. Las diferencias entre ellos son algo más acusadas en los valores altos de dichos índices, donde SAVI, tal y como se ha obtenido, da valores más bajos de lo que deberían ser.

Las curvas de evolución obtenidas con VARI-TOA presentan una forma similar a la de los otros dos índices en los valores bajos, aunque con valores negativos del índice. Sin embargo, cuando los valores son altos el comportamiento difiere. VARI-TOA tiende a alcanzar el valor máximo correspondiente con el mayor desarrollo vegetativo del cultivo de forma más abrupta mientras NDVI y SAVI lo hace más suavemente. En algunas fechas los VARI-TOA alcanza valores por encima de lo que cabría esperar. Deberá investigarse en el futuro este hecho para detectar que causas los producen.

Todo lo expuesto lleva a considerar al NDVI el índice más adecuado para el seguimiento de la fenología. No se descarta en el futuro el uso de SAVI si se ajusta el parámetro L (ligado a la línea de suelo) a las condiciones de cada fase del desarrollo del cultivo y VARI-TOA si se consigue explicar el por qué de los valores extremos.

Las series temporales de NDVI permiten identificar fácilmente el tipo de cultivo que hay en cada parcela de estudio: cultivo de invierno, de verano, doble cosecha o un cultivo forrajero. También permiten diferenciar grupos dentro de estos tipos que normalmente están asociados a cultivos diferentes.

Además, proporcionan información sobre la duración del ciclo del cultivo y la extensión de cada fase del desarrollo, permitiendo detectar las diferencias entre años, entre cultivos y entre parcelas con el mismo cultivo.

Sin embargo, no se consigue identificar la fecha concreta en la que se producen los diferentes estados fenológicos, pero sí asociar ciertos estados fenológicos a tramos concretos de la curva de evolución de NDVI y de su curva de pendientes. Se constata la necesidad de una serie temporal de imágenes más densa para intentar determinar con la exactitud necesaria dicho momento e identificar algún otro estado. Aun así, la fecha de siembra, emergencia y cosecha no podrá determinarse con las imágenes e índices de vegetación elegidos.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, 56, Rome.

Barros, R., Isidoro, D., Aragüés, R., (2011). Long-term water balances in La Violada Irrigation District (Spain): I. Sequential assessment and minimization of closing errors. *Agricultural Water Management* 102: 35-45.

Beck, P.S.A., Atzberger, C., Høgda, K.A., Johansen, B., Skidmore, A.K. (2006). Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 100(3): 321-334.

Bisquert, M, Sánchez, J. M, Caselles, V, Paz Andrade M. I. y Legido, J. L. (2009) Los índices de vegetación como indicadores del riesgo de incendio con imágenes del sensor TERRA-MODIS. *Revista de Teledetección*. ISSN: 1988-8740. 2010. 33: 80-91

Bolaños, J, Edmeades, G. O. (1993). La fenología del maíz. p xx-yy. En: *Síntesis de Resultados Experimentales del PRM 1992*, Vol. 4, CIMMYT, Guatemala.

Chávez, P.S., (1996). Image-based atmospheric corrections—revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62: 1025-1036.

CHE – Confederación Hidrográfica del Ebro, (2009). Evaluación del impacto medioambiental de las actividades agrarias en tres sistemas de riego de la cuenca del Ebro. Informe final del convenio de colaboración entre la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) y el Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA-DGA) del año 2008, p111.

CHE – Confederación Hidrográfica del Ebro, (2011). Evaluación del impacto medioambiental de las actividades agrarias en cinco sistemas de riego de la cuenca del Ebro. Informe final del convenio de colaboración entre la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) y el Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA-DGA) del año 2010, p252.

CHE – Confederación Hidrográfica del Ebro, (2014). Evaluación del impacto medioambiental de las actividades agrarias en cuatro sistemas de riego de la cuenca del Ebro. Informe final del convenio de colaboración entre la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) y el Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA-DGA) del año 2010, p252.

Chuvieco, E. (2010): *Teledetección ambiental*, 3ª edición revisada, Barcelona, Editorial Ariel 2010.

Faci, J., Aragüés, R., Alberto, F., Quílez, D., Machín, J., Arrúe, J.L., (1985). Water and Salt balance in an irrigated area of the Ebro River basin (Spain). *Irrigation Science* 6: 29-37

Faci, J.M., Besaci, A., Slatni, A., Playán, E., (2000). A case study for irrigation modernisation. I. Characterisation of the district and analysis of water delivery records. *Agricultural Water Management* 42: 315-334.

García Ferrer, A. (2013). Potencialidad y nuevas orientaciones en el uso de la teledetección en agricultura y silvicultura., *Ambienta*, 6.

Gilabert, M.A., González-Piqueras, J. y García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección*, Vol. 8, pp. 1-10.

- Gitelson, A., Kaufman, Y., & Merzlyak, M. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58, 289 – 298.
- Gitelson, A, Kaufman Y, Stark, R, and Rundquist, (2002). D “Novel algorithms for remote sensing estimation of vegetation fraction,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 80, no. 1, pp. 76–87.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI), *Remote Sens. Environ.* 25:295-309.
- Isidoro, D., Quílez, D., Aragüés, R., (2004). Water balance and irrigation performance analysis: La Violada irrigation district (Spain) as a case study, *Agricultural Water Management* 64: 123-142.
- Jackson, R.D., Slater, P.N. y Pinter, P.J. (1983). Discrimination of wrowth and wáter stress in wheat by various vegetation índices thorough clear and turbid atmosferes. *Remote sensing of the Environment*, Vol. 13, pp- 187-208.
- Jiménez-Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., Plaza, A., Guanter, L., Moreno, J., & Martínez, P. (2009). Comparison between fractional vegetation cover retrievals from vegetation indices and spectral mixture analysis: Case study of PROBA/CHRIS data over an agricultural area. *Sensors*, 9: 768-793.
- Li, P.; Jiang, L.; Feng, Z. (2014). Cross-Comparison of vegetation indices derived from Landsat-7 enhanced thematic mapper plus (ETM+) and Landsat-8 operational land imager (OLI) sensors. *Remote Sens*, 6, 310–329
- López-Lozano, R., Casterad, M.A. (2005). Uso de técnicas SIG y Teledetección en el seguimiento del cultivo de viña. El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas pág. 691-697.
- Muñoz, P.A. (2015). Índices de Vegetación, Geógrafo, *CIREN*.
- Pérez-Cabello, F. (2016). Materiales didácticos de la asignatura. Tratamiento digital de las imágenes de satélite. Master en Tecnologías de la Información Geográfica para la ordenación del Territorio: SIG y Teledetección, Universidad de Zaragoza. 108pp.
- Plan Nacional de Teledetección (PNT). Instituto Geográfico Nacional (IGN). (<http://pnt.ign.es/>)
- Playán E., Slatni A., Castillo R., Faci J.M., (2000). A case study for irrigation modernization II. Scenario analysis. *Agricultural Water Management* 42: 335–354.
- Portero, C. y Casterad, M.A. (1999): Influencia del tamaño de pixel en la definición de áreas de entrenamiento. VIII Congreso Nacional de Teledetección. Albacete-España, pp. 411-414.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. y Harlan, J.C. (1974). Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. Type III, Final Report, NASA/GSFC, Green-belt, 371 pp.
- Savitsky A. & Golav, M.J.E. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Arnl. C hem.* 36, 627 - 639.
- Schneider and Miller. (1981). Description of Sunflower Growth Stages. *Crop Science*, Vol. 21.
- Sentinels Scientific Data Hub. Copernicus (ESA). (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)
- Steven, M. D., Malthus, T. J., Baret, F., Xu, H., & Chopping, M. J. (2003). Intercalibration of vegetation indices from different sensor systems. *Remote Sensing of Environment*, 88(4), 412-422.



Thenkabail, P.S., Knox, J.W., Ozdogan, M., Gumma, M. K., Congalton, R.G., Wu, Z., Miseli, C., Finkral, A., Marshall, M., Mariotto, I., You, S., Giri, C.P., Nagler, P.L. (2012). Assessing future risks to agricultural productivity, water resources and food security how can remote sensing help? *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 78(8): 773-782.

Torres, M., (1983). Balance hidrosalino de un polígono de riego en los Llanos de La Violada (Huesca). Tesis de Master del Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza (CIHEAM-IAMZ), Zaragoza, 273 p.

United States Geological Survey (USGS). <http://glovis.usgs.gov/>

Vina, A., Gitelson, A. A., Rundquist, D. C., Keydan, G., Leavitt, ~ B., and Schepers, J. (2004). Monitoring maize (*Zea mays* L.) phenology with remote sensing, *Agron. J.*, 96, 1139–1147.

Volpe, C. A. (1992). Citrus Phenology. In: *Proceedings of the Second International Seminar on Citrus Physiology*, p. 103-122.

Wang, J., Huang, J. F., Wang, X. Z., Jin, M. T., Zhou, Z., Guo, Q. Y., ... & Song, X. D. (2015). Estimation of rice phenology date using integrated HJ-1 CCD and Landsat-8 OLI vegetation indices time-series images. *Journal of Zhejiang University Science B*, 16(10), 832-844.

Zadoks J. C., Chang T. T., Konzak C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed research*. Volume 14, Issue. pp 415–421

Zhang, X., Friedl, M.A., Schaaf, C.B., Strahler, A.H., Hodges, J.C.F., Gao, F., Reed, B.C., Huete, A. (2003). Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84(3): 471-475. doi:10.1016/S0034-4257(02)00135-9

## **9. ANEJOS**



## ANEJO 1: DATOS FENOLÓGICOS DE LAS PARCELAS DE ESTUDIO (2015 – 2016)

**Tabla 1.** Datos fenológicos de los cultivos de invierno: trigo y cebada (Fuente, Tesis doctoral Wafa Malik, en curso)

Año	Parcela	Cultivo encuestado	Variedad	Fecha siembra	Fecha cosecha (agricultor)	Emergencia (1)	Encañazon (3.1)	Estado de bota (4.9)	Espigazón (5.9)	Antesis (6)	Inicio llenado de grano (7)	Fin llenado de grano (8.9)	Madurez fisiológica (9)	Cosecha CITA
2015	1	Cebada	Meseta	08/11/2014	18/06/2015	26/11/2014	10/03/2015	14/04/2015	24/04/2015	09/05/2015	11/05/2015	19/05/2015	21/05/2015	09/06/2015
2015	7	Cebada	Pewter x malta	15/11/2014	30/06/2015	03/12/2014	10/03/2015	21/04/2015	11/05/2015	14/05/2015	15/05/2015	21/05/2015	04/06/2015	17/06/2015
2015	13	Cebada	Meseta	14/12/2014	09/06/2015	24/12/2014	14/04/2015	21/04/2015	11/05/2015	13/05/2015	15/05/2015	20/05/2015	27/05/2015	09/06/2015
2015	15	Cebada	Gustav	20/11/2014	05/06/2015	03/12/2014	01/04/2015	18/04/2015	21/04/2015	25/04/2015	11/05/2015	19/05/2015	26/05/2015	09/06/2015
2015	8	Trigo	Torero	29/11/2014	30/06/2015	17/12/2014	14/04/2015	28/04/2015	03/05/2015	09/05/2015	11/05/2015	19/05/2015	09/06/2015	25/06/2015
2016	1	Cebada					29/03/2016	24/04/2016	06/05/2016	11/05/2016	16/05/2016	08/06/2016	08/06/2016	08/06/2016
2016	9	Cebada					11/03/2016	26/04/2016	06/05/2016	09/05/2016	11/05/2015	02/06/2016	08/06/2016	16/06/2016
2016	13	Cebada					11/03/2016	21/04/2016	06/05/2016	11/05/2016	16/05/2016	08/06/2016	08/06/2016	08/06/2016
2016	14	Cebada					11/03/2016	18/04/2016	11/05/2016	12/05/2015	16/05/2016	08/06/2016	08/06/2016	08/06/2016
2016	6	Trigo					03/04/2016	12/04/2016	21/04/2016	23/04/2016	11/05/2016	10/06/2016	10/06/2016	16/06/2016
2016	10	Trigo					03/04/2016	21/04/2016	28/04/2015	30/04/2016	16/05/2016	08/06/2016	16/06/2016	16/06/2016

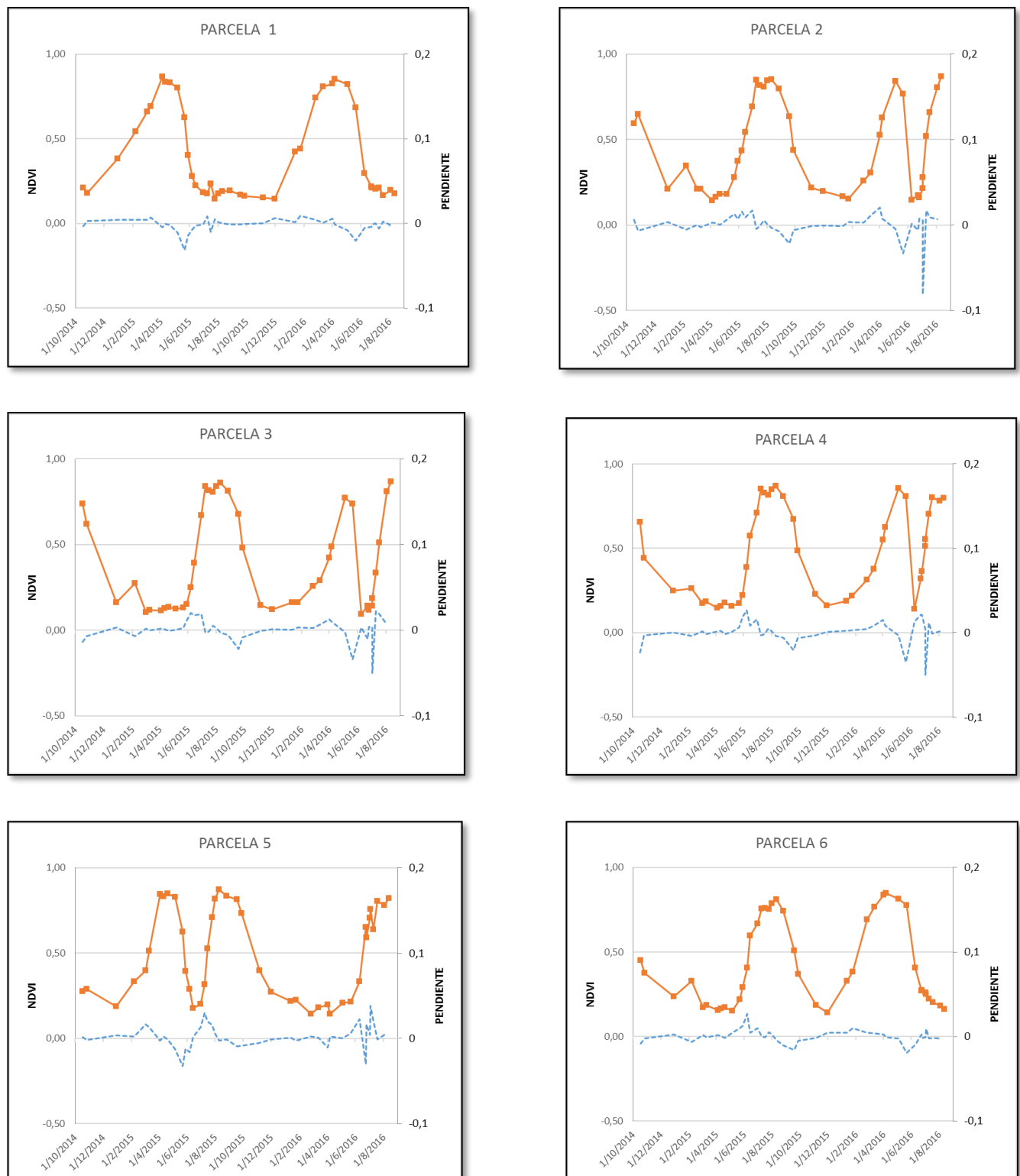
**Tabla 2.** Datos fenológicos del cultivo de maíz (Fuente, Tesis doctoral Wafa Malik, en curso)

Año	Parcela	Cultivo encuestado	Variedad	Siembra	Emergencia (VE)	Fin de la fase juvenil	Panojamiento (VT)	Antesis (R0)	Floración femenina (R1)	Cuaje (ampolla, R2)	Grano dentado (R5)	Madurez fisiológica (R6)	Cosecha (CI-TA)	Cosecha (Agricultor)
2015	2	Maíz	Pioner C700, 33D48	13/04/2015	18/04/2015	06/07/2015	11/07/2015	13/07/2015	16/07/2015	23/07/2015	25/08/2015	11/09/2015	14/10/2015	26/11/2015
2015	3	Maíz	Poboa	12/04/2015	17/04/2015	12/07/2015	14/07/2015	16/07/2015	20/07/2015	25/07/2015	25/08/2015	11/09/2015	14/10/2015	11/10/2015
2015	6	Maíz	63:40ciclo600	10/04/2015	15/04/2015	02/07/2015	09/07/2015	14/07/2015	16/07/2015	28/07/2015	25/08/2015	16/09/2015	14/10/2015	26/10/2015
2015	12	Maíz	Decal 67C700/650	17/04/2015	23/04/2015	02/07/2015	09/07/2015	11/07/2015	16/07/2015	23/07/2015	25/08/2015	16/09/2015	14/10/2015	15/11/2015
2015	14	Maíz	LG ANTISS	14/04/2015	19/04/2015	02/07/2015	11/07/2015	13/07/2015	16/07/2015	23/07/2015	25/08/2015	11/09/2015	14/10/2015	24/11/2015
2015	15	Maíz	LG30-4904G	18/06/2015	23/06/2015	16/08/2015	20/08/2015	22/08/2015	25/08/2015	03/09/2015	21/10/2015	02/11/2015	25/11/2015	15/01/2016
2016	5	Maíz				11/07/2016	13/07/2016	15/07/2016	22/07/2016	03/08/2016	01/09/2016	14/09/2016		
2016	2	Maíz		16/06/2016	23/06/2016	12/08/2016	15/08/2016		18/08/2016	01/09/2016	30/09/2016	27/10/2016		
2016	8	Maíz				01/08/2016	03/08/2016	05/08/2016	18/08/2016	24/08/2016	30/09/2016	20/10/2016		
2016	9	Maíz		30/06/2016	06/07/2016	23/08/2016	24/08/2016	26/08/2016	01/09/2016	18/09/2016	13/10/2016			
2016	15	Maíz		19/04/2016	11/05/2016	23/07/2016	27/07/2016	29/07/2016	03/08/2016	18/08/2016	14/09/2016	30/09/2016	27/10/2016	
2016	3	Maíz		16/06/2016	23/06/2016	18/08/2016	20/08/2016	22/08/2016	24/08/2016	01/09/2016	30/09/2016	27/10/2016		

**Tabla 3.** Datos fenológicos del cultivo de girasol (Fuente, Tesis doctoral Wafa Malik, en curso)

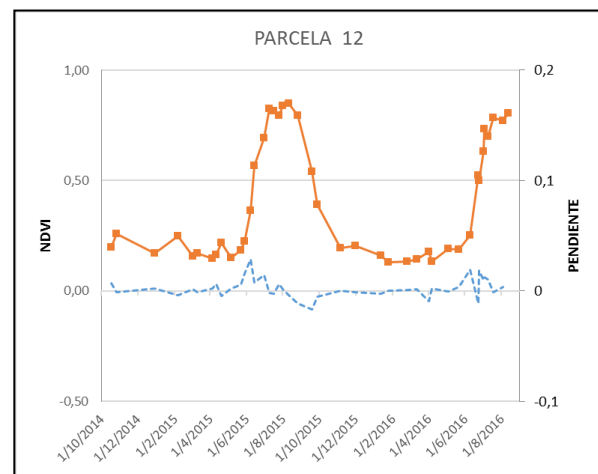
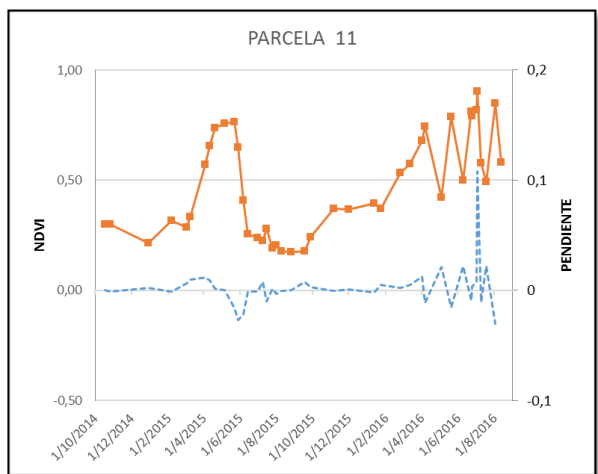
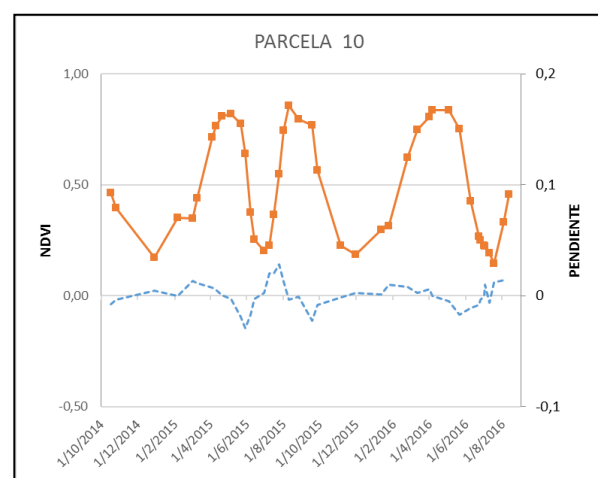
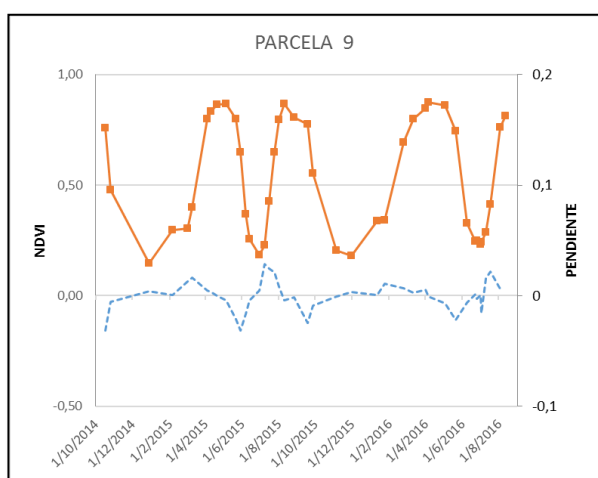
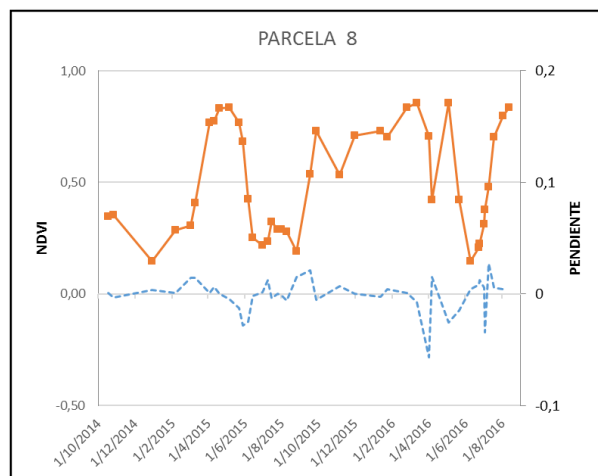
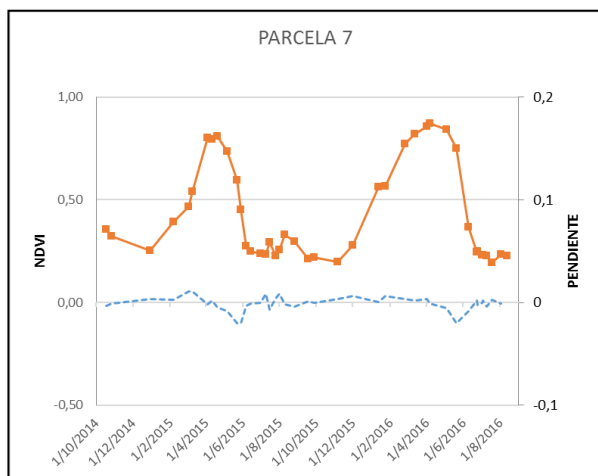
<b>Año</b>	<b>Parcela</b>	<b>Cultivo en- cuestado</b>	<b>Variedad</b>	<b>Fecha siembra</b>	<b>Estado de cotiledón (VE)</b>	<b>Fin de fase juvenil</b>	<b>R1</b>	<b>Antesis (R5)</b>	<b>Madurez fisio- lógica (R9)</b>	<b>Cosecha (CITA)</b>	<b>Cosecha (Agricultor)</b>
<b>2015</b>	9	Girasol	CARGIL	24/06/2015	03/07/2015	29/07/2015	04/08/2015	20/08/2015	10/10/2015	21/10/2015	15/10/2015
<b>2015</b>	10	Girasol	CARGIL	24/06/2015	03/07/2015	29/07/2015	04/08/2015	20/08/2015	10/10/2015	21/10/2015	15/10/2015
<b>2015</b>	13	Girasol	X	25/06/2015	05/07/2015	23/07/2015	06/08/2015	25/08/2015	10/10/2015	21/10/2015	25/10/2015
<b>2016</b>	4	Girasol		02/06/2016	08/06/2016	30/06/2016	07/07/2016	10/08/2016	14/09/2016	30/09/2016	30/09/2016
<b>2016</b>	14	Girasol		30/06/2016	07/07/2016	03/08/2016	10/08/2016	01/09/2016	27/10/2016	27/10/2016	

## ANEJO 2: SERIES TEMPORALES DE NDVI Y SU PENDIENTE EN LAS PARCELAS DE ESTUDIO (2015-2016)

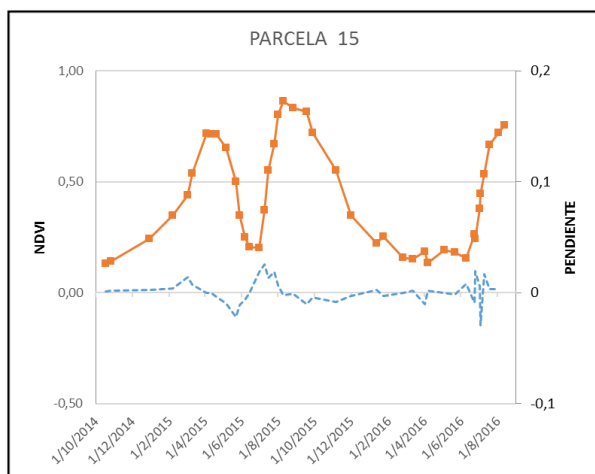
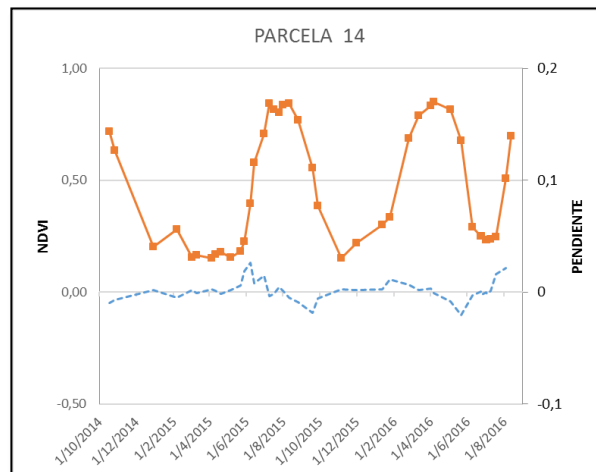
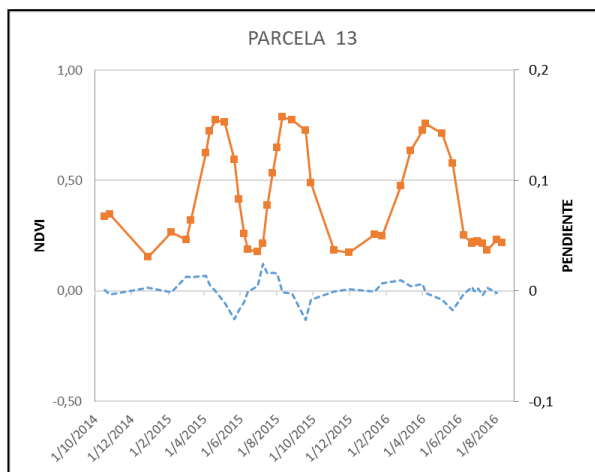


**Figura 1.** Serie temporal de NDVI y su pendiente para las parcelas 1 a 6





**Figura 2.** Serie temporal de NDVI y su pendiente para las parcelas 7 a 12



**Figura 3.** Serie temporal de NDVI y su pendiente para las parcelas 13 a 15